

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΦΑΝΤΑΟΥΤΣΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΤΜ6622

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΑΥΡΟΜΑΤΑΚΗΣ ΦΩΤΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία επικεντρώνεται στην συγκριτική αξιολόγηση ρυθμιστών φόρτισης PWM και MPPT σε αυτόνομα συστήματα φωτοβολταϊκά συστήματα με έμφαση στην ενεργειακή απόδοση και την αξιοπιστία. Οι ρυθμιστές PWM περιορίζονται από απώλειες ενέργειας λόγω αδυναμίας αξιοποίησης υψηλότερων τάσεων ενώ οι ρυθμιστές MPPT βελτιστοποιούν την ισχύ αποδίδοντας 10 με 30 % περισσότερη ενέργεια. Αναλύονται δεδομένα από μετρήσεις όπου ο ρυθμιστής MPPT παρουσιάζει μέση απόδοση 90% έναντι 80% του PWM με πιο σταθερή απόδοση και καλύτερη προσαρμογή σε μεταβλητές συνθήκες. Η επιλογή ρυθμιστή εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος το κόστος και τις κλιματικές συνθήκες με τους MPPT ρυθμιστές να υπερέχουν σε μεγαλύτερα συστήματα η περιοχές με χαμηλή ηλιοφάνεια.

SUMMARY

The thesis focuses on the comparative evaluation of PWM and MPPT charge controllers in standalone photovoltaic systems, emphasizing energy efficiency and reliability. PWM controllers are limited by energy losses due to their inability to utilize higher voltages, while MPPT controllers optimize power output, delivering 10-30% more energy. Data from measurements show MPPT achieving an average efficiency of 88.8-89.5% compared to 79.1-80.0% for PWM, with more stable performance and better adaptability to variable conditions. The choice of controller depends on system size, cost, and climatic conditions, with MPPT excelling in larger systems or areas with low sunlight.

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι αυτόνομες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις βασίζονται στους συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας. Για την προστασία τους και την φόρτιση τους χρησιμοποιούνται οι ρυθμιστές φόρτισης PWM (PULSE WIDTH MODULATION) και MPPT(MAXIMUM POWER POINT TRACKING). Και οι δύο τεχνολογίες έχουν ως στόχο τη ρύθμιση της φόρτισης ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση και η εκφόρτιση της μπαταρίας, όμως διαφέρουν σημαντικά στον τρόπο λειτουργίας και την απόδοση τους.

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η συγκριτική αξιολόγηση των δύο αυτών ειδών ρυθμιστών φόρτισης με έμφαση στην ανάδειξη των διαφορών τους στην ενεργειακή απόδοση τους και την αξιοπιστία τους. Συγκεκριμένα θα εξεταστεί πώς κάθε τεχνολογία επηρεάζει την αξιοποίηση της διαθέσιμης ηλιακής ισχύος την αποδοτικότητα φόρτισης της μπαταρίας καθώς και πόσο αξιόπιστη είναι η λειτουργία τους σε βάθος χρόνου και διαφορετικές συνθήκες. Για παράδειγμα

ένας ρυθμιστής MPPT είναι ικανός να απορροφήσει έως και 20-30% περισσότερη ενέργεια από τα φωτοβολοταϊκά πλαίσια σε σύγκριση με έναν ρυθμιστή PWM, λόγω του ότι αξιοποιεί το μέγιστο σημείο ισχύος του πλαισίου ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το σημαντικό πλεονέκτημα στην απόδοση ενός συστήματος σε περιοχές με μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες. Από την άλλη πλευρά οι PWM ρυθμιστές λόγω του απλούστερου τρόπου λειτουργίας τους αδυνατούν να αξιοποιήσουν πλήρως τις τάσεις πάνω από αυτής της μπαταρίας με αποτέλεσμα η πλεονάζουσα ισχύς να χάνεται ως θερμότητα. Η εργασία στοχεύει να αποτιμήσει κατά πόσο οι θεωρητικές αυτές διαφορές αξιοπιστίας επιβεβαιώνονται και στην πράξη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο……..…...7

1.1Ανακαλύψεις του 19ου Αιώνα ……....7

1.2 Τεχνολογική εξέλιξη στον 20ό - 21ο αιώνα.……...8

1.3 Σημασία της Ηλιακής Ενέργειας ……....8

1.4 Μελλοντικές Προκλήσεις και Προοπτικές ……....8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ……..10

2.2 Αυτόνομα & Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα……..…...10

2.2.1 Σύγκριση Αυτόνομων & Διασυνδεδεμένων Φ/Β Συστημάτων…….……..11

2.3 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια……...12

2.3.1 Ορισμός και Λειτουργία……..12

2.3.2 Αρχή λειτουργίας……..…12

2.3.3 Δομή και Υλικά……....12

2.3.4 Εφαρμογές……...….13

2.4 Είδη Φωτοβολταϊκων Πλαισίων……..…14

2.4.1 Μονοκρυσταλλικά Πλαίσια…….14

2.4.2 Πολυκρυσταλλικά Πλαίσια…….....16

2.4.3 Thin-film……...…18

2.5.4 Πλαίσια διπλής Όψης……...….19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΦΟΡΤΙΣΤΕΣ MPPT & PWM

3.1 Ρυθμιστές Φόρτισης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων: MPPT και PWM…….….20

3.2 Φορτιστής MPPT – Αρχή Λειτουργίας και Χαρακτηριστικά……..…..20

3.2.1 Καμπύλες I-V & P-V……....21

3.2.2 Διάγραμμα Μετατροπής Ισχύος από MPPT……....22

3.3 Αλγόριθμοι MPPT (Perturb & Observe, Incremental Conductance)……..…22

3.3.1.Perturb and Observe (Αλγόριθμος μεταβολής και παρατήρησης)…….....22

3.3.2 Διάγραμμα P–V και I–V με Σημεία Παρακολούθησης…….……..….23
3.3.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ P&O…….….24
3.3.4 Incremental Conductance (Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας)……...…26
3.3.5 Καμπύλη Ισχύος (P–V) και Παράγωγος……..26
3.3.6 Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου IC – Βήμα προς Βήμα…….…..27
3.3.7 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ MPPT…….……28
3.3.8 Εφαρμογές των MPPT…….…29
3.4 Φορτιστής PWM - Αρχή λειτουργίας και Χαρακτηριστικά…….…….……30
3.4.1 Διάγραμμα Συστήματος PWM…….……...30
3.4.2 Ανάλυση Παραδείγματος PWM…….…….31
3.4.3 Καμπύλες I-V & P-V…….……..31
3.4.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των PWM…….……32
3.4.5 Τα μειονεκτήματα των φορτιστών PWM είναι τα εξής…….…….33
3.4.6 Εφαρμογές PWM …….……..33
3.5 Σύγκριση Τεχνολογιών MPPT και PWM…….....34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

4.1 Συσσωρευτές σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα…….35
4.2 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών……....35
4.2.1 Χωρητικότητα (Ah – Wh)……...…….35
4.2.2 Ονομαστική Τάση……..…..…..36
4.2.3 Μπαταρίες μολύβδου……...…….36
4.2.4 Μπαταρίες λιθίου τύπου LiFePO4…….……..36
4.2.5 Βάθος Εκφόρτισης (DoD – Depth of Discharge)…….……36
4.2.6 Κύκλοι Ζωής Μπαταρίας…….37
4.2.7 Απόδοση Ενέργειας……...……...37
4.2.8 Συντήρηση & Αυτοεκφόρτιση…….38
4.2.9 Αυτοεκφόρτιση……..……..38
4.3 Βασικές Τεχνολογίες Συσσωρευτών……..38

4.3.1 Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος (Flooded)……..…..……38
4.3.2 Μπαταρίες AGM (VRLA με Absorbent Glass Mat)……..……...38
4.3.3 Μπαταρίες Gel (VRLA με τζελ ηλεκτρολύτη)…….…….……39
4.3.4 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου ($LiFePO_4$)…….……...39
4.4 Ρυθμιστές Φόρτισης PWM & MPPT και Σωστή Διαχείριση Φόρτισης…….....39
4.5 Διαστασιολόγηση των συσσωρευτών σε αυτόνομα συστήματα…….....40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ
5.1 ΕΝΕΡΓΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ MPPT & PWM……42
5.1.2 ΗΜΕΡΑ 3-6-23……..44
5.1.3 ΗΜΕΡΑ 9-6-23……..48
5.1.4 ΗΜΕΡΑ 27-6-23…….....52
5.1.5 ΗΜΕΡΑ 6-7-23……..56
5.1.6 ΗΜΕΡΑ 13-7-23……60
5.1.7 ΗΜΕΡΑ 22-7-23…….....64
5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ & ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ……..…68
5.2.1 Πίνακας ημερήσιων αποτελεσμάτων για τον μήνα ΙΟΥΝΙΟΣ…….……68
5.2.2 Πίνακας ημερήσιων αποτελεσμάτων για τον μήνα ΙΟΥΝΙΟΣ…….74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ…….....80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

Εισαγωγή στην Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

1. Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η διαδικασία κατά την οποία η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω υλικών ,όπως το πυρίτιο. Όταν το φως πέφτει σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, τα φωτόνια διεγείρουν τα ηλεκτρόνια του υλικού δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η διαδικασία είναι η βάση για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας, η οποία θεωρείται μια ανεξάντλητη και καθαρή πηγή ενέργειας. [1]

1.1 Ανακαλύψεις του 19ου Αιώνα

Ο 19ος αιώνας ήταν μια περίοδος σημαντικών επιστημονικών ανακαλύψεων που έθεσαν τις βάσεις για την κατανόηση και την εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Ας εξετάσουμε κάποιες από τις πιο σημαντικές στιγμές αυτής της περιόδου.

Η Ανακάλυψη του Edmond Becquerel (1839)

- **Ορόσημο:** Ο Edmond Becquerel, σε ηλικία μόλις 19 ετών, παρατήρησε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά τη διάρκεια πειραμάτων με μια κυψελίδα που είχε τοποθετηθεί στο φως του ήλιου. [1]
- **Πείραμα:** Ο Μπεκερέλ δημιούργησε ένα απλό ηλεκτροχημικό κύτταρο χρησιμοποιώντας δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια βυθισμένα σε ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα όπως υδροχλωρικό οξύ η χλωριούχο νάτριο. Το ένα ηλεκτρόδιο εκτέθηκε στο φως ενώ το άλλο παρέμεινε στην σκιά. Τα ηλεκτρόδια συνδέθηκαν με ένα γαλβανόμετρο το οποίο κατέγραψε την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος όταν το φως έπεφτε στο εκτεθειμένο ηλεκτρόδιο. Παρατηρήθηκε ότι το ρεύμα σταματούσε όταν το φως απομακρυνόταν. [1]
- **Σημασία:** Αυτή η παρατήρηση ήταν η πρώτη άμεση απόδειξη της μετατροπής φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, και έθεσε τις βάσεις για τις μελλοντικές έρευνες στον τομέα της ηλιακής ενέργειας.

Περαιτέρω Ανακαλύψεις και Πειράματα

- **Ανακαλύψεις στα Ημιάγωγα:** Καθώς η επιστήμη των υλικών εξελίσσονταν, οι ερευνητές άρχισαν να εξετάζουν τις ιδιότητες των ημιαγωγών και τον τρόπο με τον οποίο αυτές μπορούσαν να επηρεάσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φως.
- **Εξέλιξη Τεχνολογίας:** Οι βελτιώσεις στην κατασκευή ηλεκτροδίων και η καλύτερη κατανόηση των ηλεκτροχημικών διεργασιών επέτρεψαν πιο αποτελεσματική μελέτη και χρήση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.
- **Θεμελίωση Θεωρητικών Βάσεων:** Η ανάπτυξη της κβαντομηχανικής και η κατανόηση της φύσης του φωτός και της αλληλεπίδρασης του με την ύλη ήταν σημαντικές για την περαιτέρω εξέλιξη των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών.

Η περίοδος του 19ου αιώνα ολοκληρώθηκε με μια σειρά από θεμελιώδεις ανακαλύψεις που άνοιξαν τον δρόμο για την επαναστατική ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών στον 20ό αιώνα. Η επιστημονική κοινότητα άρχισε να αντιλαμβάνεται την αξία της ηλιακής ενέργειας ως μια πιθανή λύση για την παραγωγή καθαρής και ανεξάντλητης ενέργειας.

1.2 Τεχνολογική εξέλιξη στον 20ό - 21ο αιώνα

Η σημαντικότερη πρόοδος στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων έγινε κατά τον 20ό αιώνα. Η πρώτη πρακτική εφαρμογή ήρθε το 1954, όταν οι ερευνητές Daryl Chapin , Calvin fuller, και Gerald Pearson στα Bell Laboratories στις ΗΠΑ ανέπτυξαν το πρώτο φωτοβολταϊκό κύτταρο πυριτίου με απόδοση περίπου 6% [2]. Αυτή η ανακάλυψη οδήγησε στη χρήση φωτοβολταϊκών σε διαστημικές εφαρμογές, όπως η τροφοδοσία δορυφόρων. Η αξιοπιστία και η ικανότητα των φωτοβολταϊκών να λειτουργούν χωρίς κινητά μέρη τα κατέστησαν ιδανικά για τέτοιες χρήσεις [3] .[4] Κατά τη δεκαετία του 1970 η πετρελαϊκή κρίση ώθησε την έρευνα για εναλλακτικές πηγές ενέργειας, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών για επίγεια χρήση, όπως φωτιστικά σε απομακρυσμένες περιοχές και τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Τη δεκαετία του 1980 η μείωση του κόστους και η βελτίωση της απόδοσης οδήγησαν σε ευρύτερη χρήση ιδιαίτερα σε χώρες με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία [5]. Σήμερα τα φωτοβολταϊκα αποτελούν βασικό πυλώνα της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης, με εγκατεστημένη ισχύ που ξεπερνά το 1TW παγκοσμίως το 2023, σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας.[6]

Στην Ελλάδα, η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών ενισχύθηκε από προγράμματα όπως το «Φωτοβολταϊκά στις Στέγες» και το net-metering, με εφαρμογές σε οικίες, επιχειρήσεις και νησιωτικές περιοχές. Η ιστορική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών καταδεικνύει τη μετάβαση από μια εξειδικευμένη τεχνολογία σε μια προσιτή και ευρέως διαδεδομένη λύση.

1.3 Σημασία της Ηλιακής Ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια προσφέρει πολλά περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Ως καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον, η ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας μπορεί να δημιουργήσει νέες θέσεις εργασίας και να στηρίξει την οικονομική ανάπτυξη.

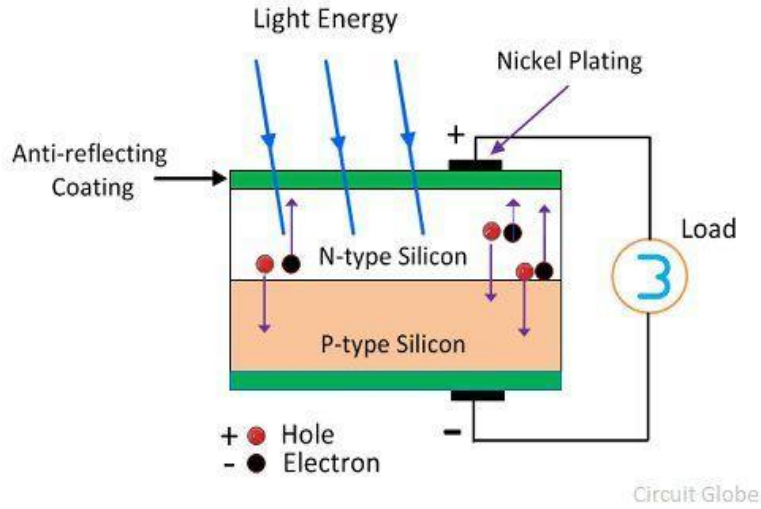
1.4 Μελλοντικές Προκλήσεις και Προοπτικές

Παρά τις πολλές ευκαιρίες, υπάρχουν επίσης προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, όπως η ανάγκη για περαιτέρω βελτίωση της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, η μείωση του κόστους και η ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1: Εντμόν μπρεκερέλ(1820-1891)

Πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Edmond_Becquerel



Εικόνα 2 : Φωτοβολταικό φαινόμενο σε ημιαγωγούς με επαφή τύπου p-n

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{Ο}

2.1 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκο σύστημα είναι αυτό που λειτουργεί ανεξάρτητα από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποίει Φωτοβολταϊκά πλαίσια για να παράγει συνεχές ρεύμα το οποίο στην συνέχεια αποθηκεύεται στις μπαταρίες, Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται από έναν inverter σε εναλλασσόμενο ρεύμα για την τροφοδότηση των ηλεκτρικών συσκευών. Τέτοιου είδους συστήματα είναι ιδανικά για απομακρυσμένες περιοχές χωρίς πρόσβαση σε ηλεκτρικό δίκτυο.

Δομή ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκο σύστημα αποτελείται από διάφορα μέρη όπου συνεργάζονται για την παραγωγή της ενέργειας την αποθήκευση της και την παροχή αυτής στις ηλεκτρικές συσκευές. Τα βασικά μέροι ενός τέτοιου συστήματος είναι τα εξής:

1. **Φωτοβολταϊκά Πλαίσια** : Τα φωτοβολταϊκα πλαίσια μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε συνεχές ρεύμα
2. **Ρυθμιστές φόρτισης** :.Είναι οι συσκευές που διαχειρίζονται την ροή της ηλεκτρικής ενέργειας από τα πλαίσια προς την μπαταρία και το φορτίο.
3. **Συσσωρευτές** : Είναι οι μονάδες αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας από τα πλαίσια
4. **Μετατροπέας** : Μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγεται σε εναλλασσόμενο για την χρησιμοποιήσει ηλεκτρικών συσκευών
5. **Φορτία** : Οι συσκευές που υπάρχουν στο αυτόνομο σύστημα όπως λάμπες, αντλίες, οικιακές συσκευές. [7]

2.2 Αυτόνομα & Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα

Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα :

- Λειτουργούν ανεξάρτητα από το δημόσιο δίκτυο
- Διασφαλίζουν αυτονομία λειτουργώντας σε διακοπές ρεύματος
- Ιδανικά για απομακρυσμένες περιοχές χωρίς πρόσβαση σε δίκτυο
- Χρειάζονται μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας
- Μεγαλύτερο αρχικό κόστος λόγο μπαταριών

Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα

- Συνδέονται άμεσα με το δίκτυο
- Δεν απαιτούν μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας
- Δεν παρέχουν αυτονομία σε περίπτωση διακοπής ρεύματος
- Χαμηλότερο αρχικό κόστος καθώς δεν χρειάζονται μπαταρίες
- Ιδανικά για περιοχές με διαθέσιμο δίκτυο για μείωση λογαριασμών ή πώληση ενέργεια

2.2.1 Σύγκριση Αυτόνομων & Διασυνδεδεμένων Φ/Β Συστημάτων

	Αυτόνομο Φ/Β Σύστημα	Διασυνδεδεμένο Φ/Β Σύστημα
Σύνδεση με Δίκτυο	Ανεξάρτητο από το δίκτυο	Απαιτεί Σύνδεση με το δίκτυο
Αποθήκευση Ενέργειας	Ναι - Απαιτεί Μπαταρίες	Όχι δεν αποθηκεύει
Αυτονομία	Ναι μέσο της Αποθήκευσης ενέργειας	Δεν παρέχεται αυτονομία σε περίπτωση διακοπείς ρεύματος
Κόστος Εγκατάστασης	Υψηλότερο λόγο μπαταριών, ρυθμιστών	Χαμηλότερο καθώς δεν χρειάζονται μπαταρίες, ρυθμιστές
Συντήρηση	Αυξημένη-Έλεγχος μπαταριών	Ελάχιστη απαιτεί μόνο καθαρισμό πλαισίου
Εφαρμογές	Απομακρυσμένες περιοχές, αυτόνομες κατοικίες	Οικιακές και εμπορικές εφαρμογές σε περιοχές με δίκτυο

Συμπεράσματα

Η επιλογή μεταξύ αυτόνομου και διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται από τις ανάγκες και τις συνθήκες της εγκατάστασης. Τα αυτόνομα συστήματα προσφέρουν ενεργειακή ανεξαρτησία και είναι κατάλληλα για περιοχές χωρίς δίκτυο αλλά απαιτούν υψηλότερο κόστος και συντήρηση. Αντίθετα τα διασυνδεδεμένα συστήματα είναι πιο οικονομικά και απλά στην εγκατάσταση αλλά εξαρτώνται από το δίκτυο και δεν παρέχουν αυτονομία σε περίπτωση διακοπής ρεύματος.[8]

2.3 Φωτοβολταϊκά Πλαίσια

2.3.1 Ορισμός και Λειτουργία

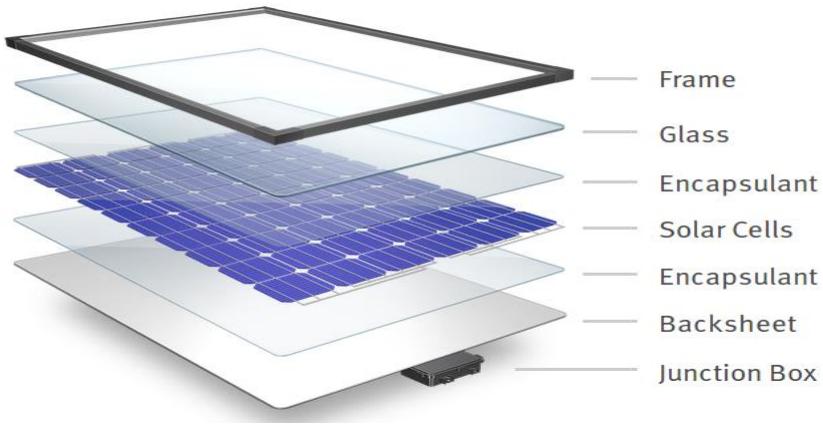
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, εκμεταλλευόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο ανακαλύφθηκε από τον Αλεξαντρ-Εντμόν Μπεκερέλ το 1839, όπως περιγράφεται προηγουμένος. Αποτελούνται από πολλαπλά φωτοβολταϊκές κυψελίδες, οι οποίες παράγουν συνεχές ρεύμα (DC) όταν εκτίθενται στο ηλιακό φως. Το ρεύμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε αυτόνομα συστήματα η να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) μέσω inverter για διασυνδεδεμένα συστήματα.[9]

2.3.2 Αρχή λειτουργίας

Όταν τα φωτόνια του ηλιακού φωτός χτυπούν τις φωτοβολταϊκές κύψελίδες, διεγείρουν τα ηλεκτρόνια, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη γωνία πρόσπτωσης του φωτός και την απόδοση των κυττάρων. Σε αυτόνομα συστήματα, όπως αυτά που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, το ρεύμα διοχετεύεται μέσω ελεγκτών φόρτισης MPPT η PWM , σε μπαταρίες για αποθήκευση.

2.3.3 Δομή και Υλικά

Ένα φωτοβολταϊκο πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα που απεικονίζει την δομή του.



Εικόνα 3 : Δομή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Πηγή : https://volton.gr/pos-leitourgoun-ta-fotovoltaika-panel/

- **Το πλαίσιο**: Είναι το εξωτερικό μεταλλικό περίβλημα συνήθως κατασκευασμένο από αλουμίνιο, που περιβάλλει τις άκρες του πλαισίου δεν συμμετέχει στην παραγωγή ενέργειας αλλά είναι δομικό και προστατευτικό στοιχείο.
- **Το Γυαλί**: Το εμπρόσθιο στρώμα από ανθεκτικό γυαλί επιτρέπει τη διέλευση του ηλιακού φωτός προς τις κυψελίδες, ενώ ταυτόχρονα τα προστατεύει από καιρικές συνθήκες, όπως βροχή, χαλάζι, σκόνη.
- **Διαφανές προστατευτικό υλικό**: Αυτό το διαφανές πολυμερές στρώμα συνήθως EVA – Ethyl vinyl Acetate περιβάλλει τις κυψελίδες, προστατεύοντας τις από υγρασία και θερμότητα ενώ διατηρεί τη δομική ακεραιότητα του πλαισίου.
- **Φωτοβολταϊκές κυψελίδες** :Οι κυψελίδες, συνήθως από πυρίτιο (μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό ή άμορφο), είναι η καρδία του πλαισίου, όπου συμβαίνει η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα για να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση και ισχύς.
- **Πίσω Επίστρωση**: Αυτή η πλαστική ή πολυμερής μεμβράνη προστατεύει την πίσω πλευρά του πλαισίου από υγρασία, υπεριώδεις ακτίνες και περιβαλλοντικές βλάβες.
- **Κουτί Σύνδεσης**: Τοποθετημένο στην πίσω πλευρά, περιέχει καλώδια και διόδους που συνδέουν τις κυψελίδες με το εξωτερικό κύκλωμα , διασφαλίζοντας την ασφαλή μεταφορά του ρεύματος και προστασία από αντίστροφη ροή.[9]

Η σωστή σχεδίαση και η ποιότητα αυτών των υλικών είναι απαραίτητα για την αποδοτικότητα και τη μακροζωία του πλαισίου, που μπορεί να φτάσει τα 20-30 χρόνια.

2.3.4 Εφαρμογές

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως:

- **Αυτόνομα Συστήματα**: Τροφοδοσία απομακρυσμένων περιοχών, όπως νησιά ή αγροτικές κατοικίες στην Ελλάδα, όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι ανέφικτη.
- **Διασυνδεδεμένα Συστήματα**: Παραγωγή ενέργειας για οικίες και επιχειρήσεις μέσω net-metering.
- **Φορητές Εφαρμογές**: Φόρτιση συσκευών, όπως τηλέφωνα ή ηλιακοί φανοί.
- **Μεγάλης Κλίμακας Εγκαταστάσεις**: Φωτοβολταϊκά πάρκα για την τροφοδοσία του ηλεκτρικού δικτύου.[10]

2.4 Είδη Φωτοβολταϊκων Πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διακρίνονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με το υλικό κατασκευής, την τεχνολογία και την εφαρμογή τους. Κάθε τύπος έχει μοναδικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, που τα καθιστούν κατάλληλα για συγκεκριμένες χρήσεις.

2.4.1 Μονοκρυσταλλικά Πλαίσια

Τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια είναι φωτοβολταϊκά που κατασκευάζονται από έναν ενιαίο κρύσταλλο πυριτίου. Αυτός ο τύπος πυριτίου έχει ομοιόμορφη δομή, που επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να κινούνται πιο εύκολα, οδηγώντας σε υψηλότερη απόδοση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλιακό φως. Χαρακτηρίζονται από το χαρακτηριστικό τους μαύρο χρώμα και το τετράγωνο σχήμα των κυττάρων τους.[11]

Πως Κατασκευάζονται

Η κατασκευή τους βασίζεται στη διαδικασία **Czochralski**. Στην αρχή, το πυρίτιο λιώνει σε υψηλές θερμοκρασίες μέσα σε ένα ειδικό χωνευτήρι. Έπειτα, ένα μικρό κομμάτι μονοκρυστάλλινου πυριτίου, γνωστό ως “σπόρος”, βυθίζεται στο λιωμένο υλικό. Ο σπόρος ανασύρεται αργά ενώ περιστρέφεται, επιτρέποντας στο πυρίτιο να κρυσταλλώνεται γύρω του και να σχηματίζει έναν μεγάλο κυλινδρικό κρύσταλλο, που ονομάζεται ingot. Αυτός ο κρύσταλλος κόβεται σε λεπτές φέτες, οι οποίες γίνονται οι κυψελίδες των πλαισίων. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει την ομοιομορφία του πλαισίου.[11]

Αποδόσεις

Τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια προσφέρουν υψηλή απόδοση, που κυμαίνεται συνήθως από 15% έως 22%. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να μετατρέψουν ένα μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, σε σύγκριση με άλλους τύπους, ακόμα και σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.

Πλεονεκτήματα

- **Υψηλή Απόδοση**: Παράγουν περισσότερη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο, ιδανικά για περιορισμένους χώρους.
- **Μεγάλη Διάρκεια Ζωής**: Μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά για πάνω από 25 χρόνια με ελάχιστη απώλεια απόδοσης.
- **Καλή Απόδοση σε Χαμηλό Φωτισμό**: Λειτουργούν καλύτερα από άλλα πλαίσια σε συννεφιασμένες ημέρες ή το πρωί/απόγευμα.

Μειονεκτήματα

- **Υψηλό Κόστος**: Η διαδικασία Czochralski είναι ενεργοβόρα και δαπανηρή, κάνοντας τα πλαίσια πιο ακριβά από άλλους τύπους.

- **Περιορισμένη Παραγωγή**: Η μέθοδος κατασκευής παράγει λιγότερα πλαίσια σε σχέση με τις απαιτήσεις της αγοράς, λόγω της πολυπλοκότητας.
- **Αισθητική Απώλεια**: Η κοπή του ingot μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια υλικού, αυξάνοντας το κόστος.[12]

Εφαρμογές

- **Οικιακά Συστήματα**: Ιδανικά για στέγες με περιορισμένο χώρο, όπου η υψηλή απόδοση είναι κρίσιμη.
- **Φωτοβολταϊκά Πάρκα**: Χρησιμοποιούνται σε μεγάλα έργα ενέργειας λόγω της αξιοπιστίας τους.
- **Περιοχές με Περιορισμένο Χώρο**: Κατάλληλα για αστικές εγκαταστάσεις ή περιοχές με υψηλές ενεργειακές ανάγκες, όπως στην Ελλάδα.
- **Εφαρμογές Υψηλής Απόδοσης**: Χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές ή συστήματα όπου η μέγιστη παραγωγή ενέργειας είναι απαραίτητη.



Εικόνα 4: Μονοκρυσταλλικό Πλαίσιο

Πηγή: https://www.shutterstock.com/el/search/monocrystalline-solar-panel

2.4.2 Πολυκρυσταλλικά Πλαίσια

Τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια κατασκευάζονται από πολλαπλούς κρυστάλλους πυριτίου. Άντι έναν ενιαίο κρύσταλλο, το πυρίτιο σε αυτά τα πλαίσια περιέχει πολλούς μικρότερους κρυστάλλους, δίνοντάς τους μια χαρακτηριστική μπλέ-γκρι εμφάνιση με ορατές γραμμές στις κύψελίδες. Αυτός ο τύπος είναι ο πιο οικονομικός σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά, διατηρώντας μια αξιοπρεπή απόδοση.

Πως κατασκευάζονται

Η κατασκευή τους βασίζεται σε μια πιο απλή διαδικασία. Το πυρίτιο λιώνεται σε ένα καλούπι και στη συνέχεια αφήνεται να κρυώσει και να στερεοποιηθεί. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, σχηματίζονται πολλοί μικροί κρύσταλλοι μέσα στο μπλοκ. Αυτό το τετράγωνο μπλόκ γνωστό ως ignot κόβεται σε λεπτές φέτες, οι οποίες γίνονται οι κυψελίδες των πλαίσιων. Η διαδικασία αυτή είναι λιγότερο πολύπλοκη από την Czochralski, επιτρέποντας μεγαλύτερη παραγωγή σε χαμηλότερο κόστος. [13]

Αποδόσεις

Τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια έχουν απόδοση που κυμαίνεται από 13% έως 17%. Αν και είναι χαμηλότερη από τα μονοκρυσταλλικά παραμένουν αποτελεσματικά για πολλές εφαρμογές ειδικά σε συνθήκες καλής ακτινοβολίας.

Πλεονεκτήματα

- **Χαμηλότερο Κόστος**: Η απλούστερη διαδικασία κατασκευής τα καθιστά πιο προσιτά από τα μονοκρυστάλλινα
- **Μεγαλύτερη Παραγωγή**: Η μέθοδος επιτρέπει την παραγωγή μεγαλύτερου αριθμού πλαίσια, καλύπτοντας τη ζήτηση της αγοράς.
- **Αξιοπιστία**: Έχουν καλή διάρκεια ζωής, συνήθως 20-25 χρόνια, με σταθερή απόδοση

Μειονεκτήματα

- **Χαμηλότερη απόδοση**: Παράγουν λιγότερη ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο σε σύγκριση με τα μονοκρυστάλλινα.
- **Αισθητική**: Η εμφάνιση με πολλούς κρυστάλλους μπορεί να μην είναι τόσο ελκυστική για ορισμένες εγκαταστάσεις.
- **Διαθέσιμος χώρος** : Λόγο της χαμηλότερης απόδοσης τους χρειάζονται περισσότερα πλαίσια για να καλυφθεί η απαιτούμενη παραγόμενη ενέργεια. [13]

Εφαρμογές

- **Μεγάλα φωτοβολταϊκα Πάρκα**: Ιδανικά για έργα όπου απαιτείται μεγάλη έκταση και χαμηλότερο κόστος.
- **Οικιακές Εγκαταστάσεις**: Χρησιμοποιούνται σε στέγες όπου το κόστος είναι σημαντικότερο από την απόδοση.
- **Εφαρμογές Χαμηλού Προϋπολογισμού**: Κατάλληλα για περιοχές που χρειάζονται οικονομικές λύσεις, όπως η απομακρυσμένες περιοχές στη Ελλάδα [13]



Εικόνα 5:Πολλυκρισταλλικό πλαίσια

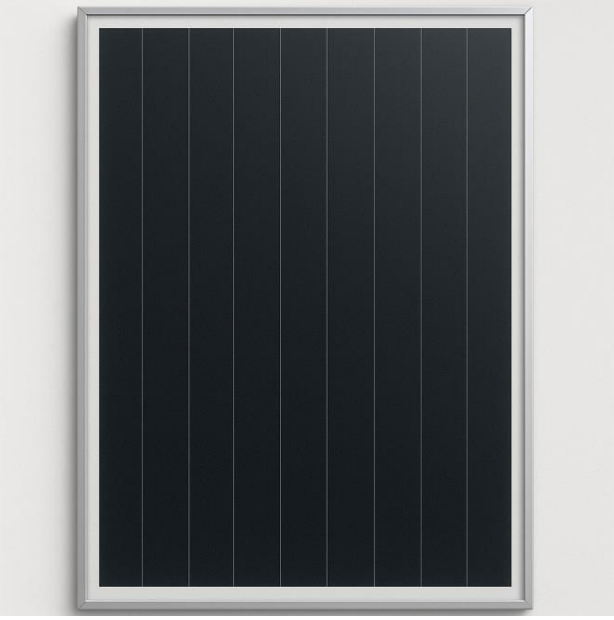
Πηγή : https://www.shutterstock.com/search/polycrystalline-solar-panel

2.4.3 Thin-film

Τα Thin-film λεπτού υμενίου πλαίσια είναι φτιαγμένα από λεπτές στρώσεις ημιαγώγιμου υλικού, οι οποίες εναποτίθενται πάνω σε υποστρώματα όπως γυαλί, πλαστικό ή μέταλλο. Αυτά τα υλικά διαφέρουν σημαντικά από το κρυσταλλικό πυρίτιο που χρησιμοποιείται στα μονοκρυσταλλικά και πολυκρασταλλικά πλαίσια. Τα κύρια υλικά κατασκευής είναι το άμορφο πυρίτιο, Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe), χαλκός-Ίνδιο-Γάλλιο-Σελήνιο (CIGS).

Διαδικασία Κατασκευής

- **Επιλογή Υποστρώματος**: Χρησιμοποιείται ένα βασικό υλικό, όπως γυαλί, μέταλλο ή πλαστικό ως βάση για τα στρώματα
- **Καταβύθιση Υλικών**: Τα φωτοευαίσθητα υλικά, όπως το CdTe ή το CIGS, εφαρμόζονται σε λεπτά στρώματα πάνω στο υπόστρωμα με ειδικές τεχνικές όπως ψεκασμός.
- **Δημιουργία Στρωμάτων**: Προστίθενται επιπλέον στρώματα, όπως αγώγιμα υλικά και προστατευτικές επενδύσεις.
- **Τελική Επεξεργασία**: Τα πλαίσια κόβονται η διαμορφώνονται σε κατάλληλο μέγεθος και συνδέονται με ηλεκτρικά κυκλώματα.
- **Πλεονεκτήματα**: Χαμηλό κόστος, ευελιξία, καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες η διάχυτο φώς
- **Μειονεκτήματα**: Χαμηλότερη Απόδοση, μικρότερη διάρκεια ζωής, χρήση σπάνιων η τοξικών υλικών.
- **Εφαρμογές**: Φορητές εφαρμογές, ενσωμάτωση σε κτίρια, μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις.[14]



Εικόνα 6 : Thin Film πλαίσια

Πηγή:https://alternativeenergysourcesv.com/wp-content/uploads/2018/04/Thin- Film-Solar-Panel-e1523842582207.jpg

2.5.4 Πλαίσια διπλής Όψης

Τα πλαίσια διπλής όψης απορροφούν φως και από τις δύο πλευρές, εκμεταλλευόμενα την ανάκλαση από το έδαφος. Η απόδοση τους μπορεί να αυξηθεί κατά 10-30% σε σχέση με τα συμβατικά πλαίσια.

- **Πλεονεκτήματα**: Αυξημένη παραγωγή ενέργειας, κατάλληλα για περιοχές με ανάκλαση πχ. Χίονι
- **Μειονεκτήματα**: Υψηλότερο κόστος, απαιτούν ειδικό σχεδιασμό εγκατάστασης
- **Εφαρμογές**: Φωτοβολταϊκά πάρκα, εγκαταστάσεις σε ανακλαστικές επιφάνειες

Αναδυόμενες Τεχνολογίες

Νέες τεχνολογίες, όπως τα φωτοβολταϊκά από περοβσκίτη και τα οργανικά φωτοβολταϊκά υπόσχονται υψηλότερες αποδόσεις και χαμηλότερο κόστος, Οι κυψελίδες περοβσκίτη, για παράδειγμα έχουν επιτύχει υψηλές αποδόσεις σε εργαστηριακές συνθήκες και ερευνώνται για εμπορική χρήση.

Επιλογή Πλαισίου

Η επιλογή του τύπου πλαισίου εξαρτάται από το κόστος, τον διαθέσιμο χώρο, τις κλιματικές συνθήκες και τις ενεργειακές απαιτήσεις, Στην Ελλάδα τα μονοκρυσταλλικά και τα πολλυκρυσταλλικά πλαίσια κυριαρχούν λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ του λεπτού υμενίου χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις όπως ενσωματωμένα σε κτήρια προσόψεις στέγες ή και παράθυρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{Ο}

3.1 Ρυθμιστές Φόρτισης ΦωτοβολταΪκών Συστημάτων: MPPT και PWM

Η απόδοση και η αξιοπιστία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζεται τη ροή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια προς τις μπαταρίες αποθήκευσης. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές που ονομάζονται ρυθμιστές φόρτισης οι οποίες ρυθμίζουν τη φόρτιση των συσσωρευτών ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση ή η εκφόρτιση τους σε επικίνδυνα επίπεδα.

Οι δύο βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι PWM (Pulse Width Modulation) και οι MPPT(Maximum Power Point Tracking). Οι φορτιστές PWM αποτελούν την απλούστερη μορφή ρύθμισης κατάλληλοι για χαμηλού κόστους εφαρμογές , ενώ οι MPPT εκπροσωπούν μια πιο σύγχρονη και αποδοτική τεχνολογία, με δυνατότητα βελτιστοποίησης της ισχύος που απορροφάται από τα φωτοβολταϊκά. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι αρχές λειτουργίας, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και οι συνήθεις εφαρμογές των δύο τύπων φορτιστών, ώστε να γίνει κατανοητή η σημασία της επιλογής του κατάλληλου ρυθμιστή για κάθε σύστημα. [15]

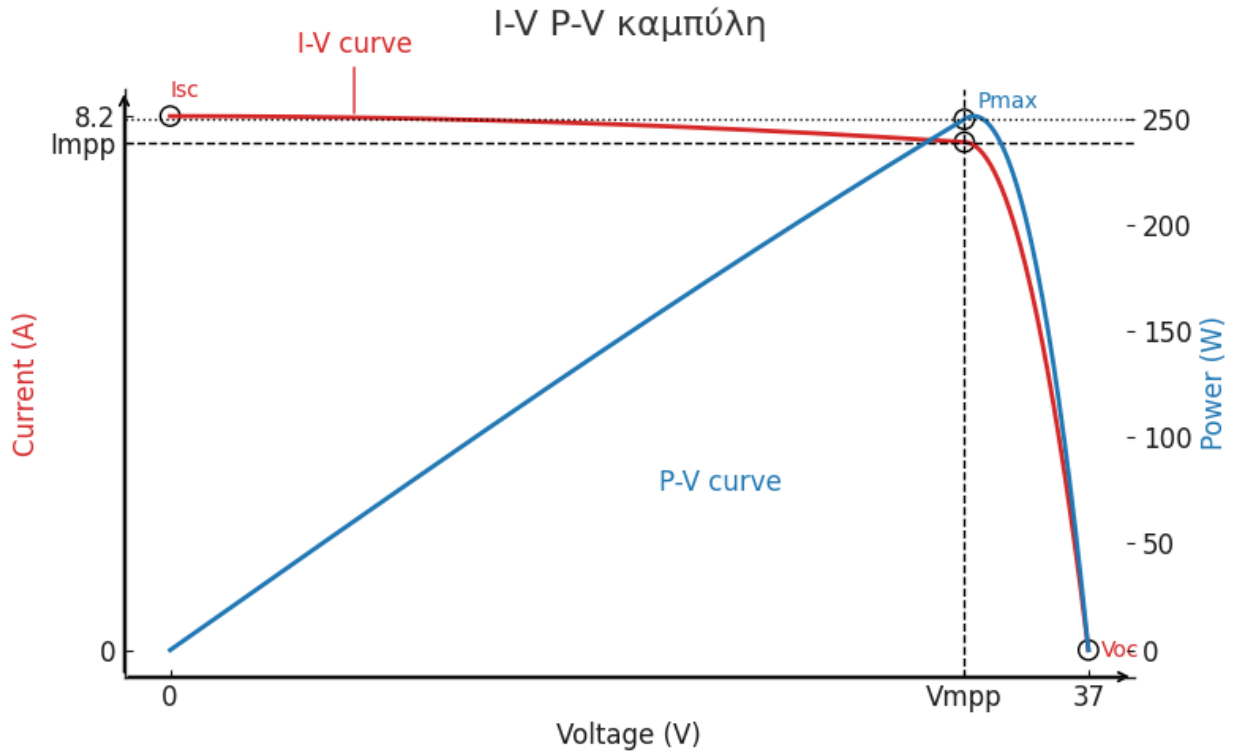
3.2 Φορτιστής MPPT – Αρχή Λειτουργίας και Χαρακτήριστικά

Ένας φορτιστής MPPT (Παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος) είναι ένας φορτιστής που στοχεύει να εξάγει την μέγιστη δυνατή ισχύ από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σε κάθε στιγμή. Σε αντίθεση με έναν απλό ρυθμιστή που λειτουργεί σαν διακόπτης, ο MPPT χρησιμοποιεί ένα έξυπνο κύκλωμα DC-DC μετατροπέα ο οποίος ρυθμίζει την τάση των φωτοβολταϊκών ανεξάρτητα από αυτήν της μπαταρίας επιτρέποντας έτσι την λειτουργία του πλαισίου στο σημείο μέγιστης απόδοσης. Με αυτόν τον τρόπο ο MPPT ρυθμίζει το ρεύμα και την τάση που αντλεί από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, διατηρώντας τα στην περιοχή του μέγιστου σημείου παρά τις μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία η τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, ένας MPPT μπορεί να φορτίζει μια μπαταρία 12V ενώ τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν σε υψηλότερη τάση (π.χ. 30–36V), μετατρέποντας αποτελεσματικά την επιπλέον τάση σε μεγαλύτερο ρεύμα φόρτισης . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολύ υψηλή αποδοτικότητα σε σύγκριση με έναν απλό ρυθμιστή PWM, ειδικά όταν η τάση λειτουργίας των πλαισίων διαφέρει σημαντικά από την τάση της μπαταρίας.

Για το παράδειγμα αυτό, χρησιμοποιούμε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με τα εξής χαρακτηριστικά:

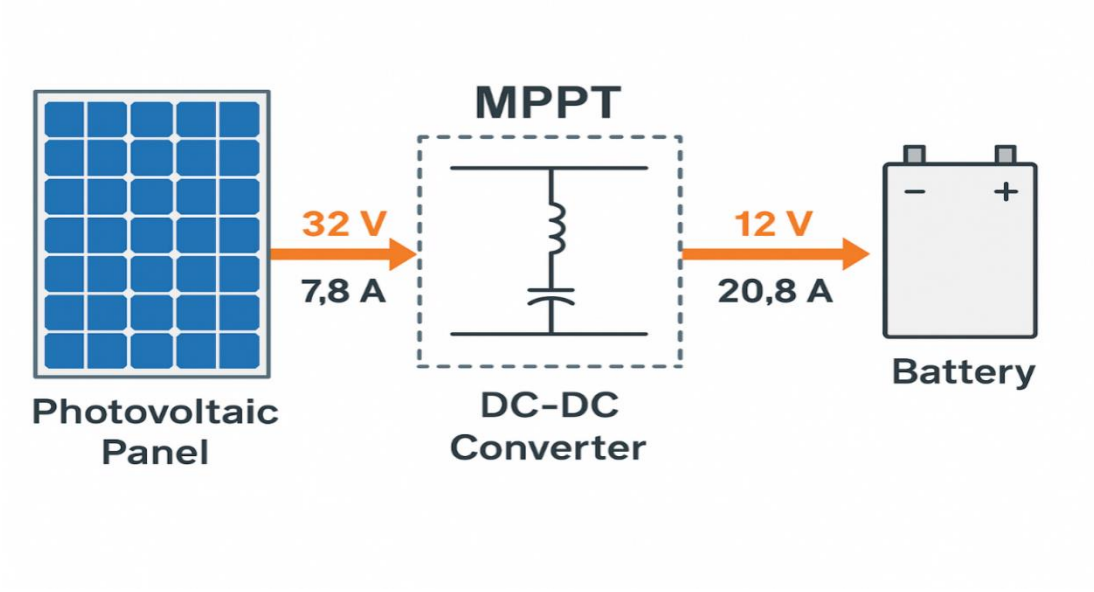
- Μέγιστη ισχύς (Pmax): 250 W
- Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (Vmpp): 32 V
- Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος (Impp): 7.8 A
- Τάση ανοικτού κυκλώματος (Voc): 37 V
- Ρεύμα βραχυκυκλώσεως (Isc): 8.2 A

3.2.1 Καμπύλες I-V & P-V



Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η καμπύλη I–V δείχνει πώς μειώνεται το ρεύμα καθώς αυξάνεται η τάση, ενώ η καμπύλη P–V δείχνει την ισχύ που παράγεται για κάθε τιμή τάσης. Το σημείο τομής των βοηθητικών γραμμών (Vmpp και Impp) υποδεικνύει το Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point – MPP). Στο σημείο αυτό, το πλαίσιο αποδίδει την μέγιστη ισχύ του που εδώ είναι 32 V × 7.8 A ≈ 250 W.[16]

3.2.2 Διάγραμμα Μετατροπής Ισχύος από MPPT



Εικόνα 7:Διάγραμμα λειτουργίας MPPT

Πηγή : https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η λειτουργία ενός MPPT ρυθμιστή φόρτισης. Ο MPPT λαμβάνει ισχύ 250 W από το φωτοβολταϊκό (32 V × 7.8 A) και τη μετατρέπει μέσω ενός μετατροπέα DC-DC σε χαμηλότερη τάση κατάλληλη για τη φόρτιση της μπαταρίας. Για παράδειγμα, αν η μπαταρία είναι στα 12 V, τότε η ίδια ισχύς μετατρέπεται σε αυξημένο ρεύμα: 250 W ÷ 12 V = 20.8 A. Έτσι επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση, αφού χρησιμοποιείται όλη η ενέργεια του πλαισίου για τη φόρτιση της μπαταρίας.[16]

3.3 Αλγόριθμοι MPPT (Perturb & Observe, Incremental Conductance)

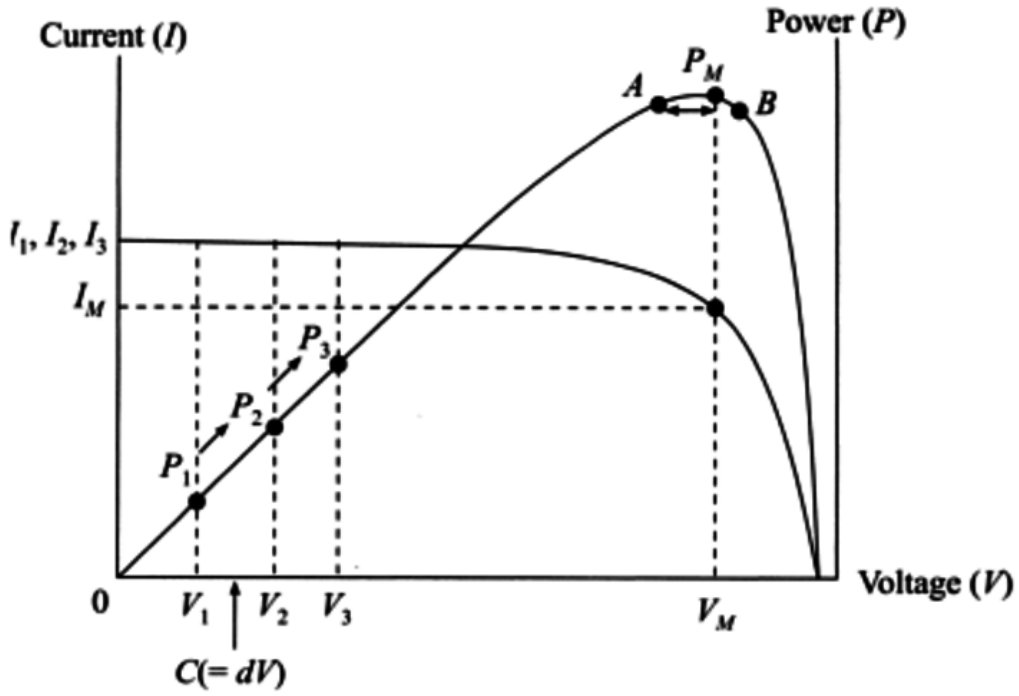
Για να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος, ο φορτιστής MPPT διαθέτει έναν μικροελεγκτή που εκτελεί εξειδικευμένους αλγόριθμους MPPT. Οι 2 πιο διαδεδομένοι είναι ο Perturb and Observe (P&O) και ο Incremental Conductance (IC)

3.3.1.Perturb and Observe (Αλγόριθμος μεταβολής και παρατήρησης):

Ο αλγόριθμος αυτός πραγματοποιεί μια μικρή μεταβολή της τάσης και παρακολουθεί την επίδραση της στην ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού. Εάν η ισχύς αυξηθεί μετά την μεταβολή, τότε το σύστημα θα συνεχίζει να μεταβάλλεται προς την ίδια κατεύθυνση αν η ισχύς μειωθεί τότε η μεταβολή θα αντιστρέψει την κατεύθυνση της. Με αυτόν τον τρόπο, το σημείο λειτουργίας ταλαντώνεται γύρω από το MPP όταν επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς. Ο P&O είναι δημοφιλής λόγο της απλότητας του, όμως παρουσιάζει μια μικρή συνεχόμενη ταλάντωση γύρω από το MPP

προκαλώντας απώλειες ισχύος και ενδέχεται να αποτυγχάνει να παρακολουθήσει σωστά το MPP υπό συνθήκες ταχείας μεταβολής όπως ξαφνικές μεταβολές ηλιοφάνειας.[17]

3.3.2 Διάγραμμα P–V και I–V με Σημεία Παρακολούθησης

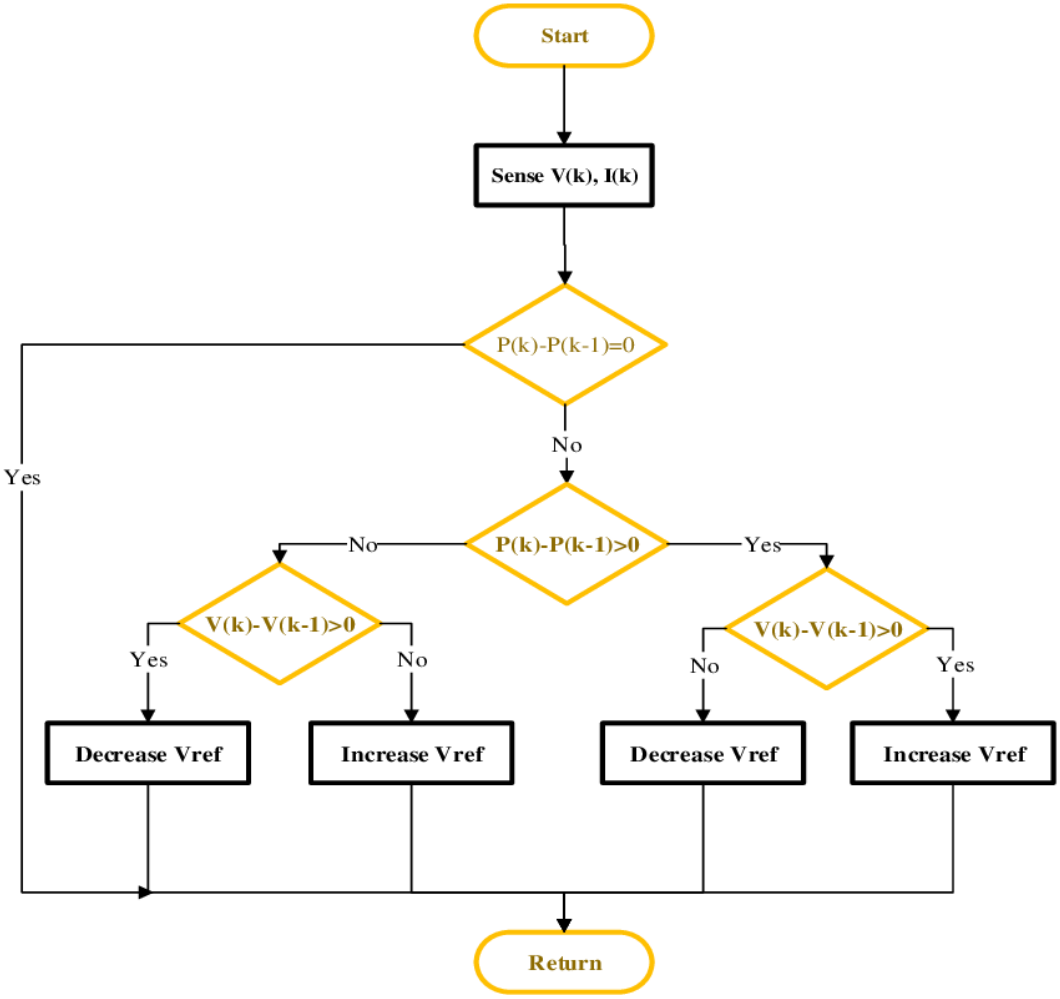


Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τη λειτουργία του αλγορίθμου Perturb and Observe (P&O) πάνω στις χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος–τάσης (P–V) και ρεύματος–τάσης (I–V) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η καμπύλη P–V παρουσιάζει μέγιστο στο σημείο MPP (Maximum Power Point), όπου η ισχύς του πλαίσιου είναι μέγιστη (P_m).

Τα σημεία P_1, P_2 και P_3 δείχνουν τις πρώτες προσπάθειες του αλγορίθμου να προσεγγίσει το MPP. Σε κάθε βήμα ο MPPT μεταβάλλει την τάση κατά C = dV και παρατηρεί την ισχύ. Εφόσον η ισχύς αυξάνεται ($P_2 > P_1$, $P_3 > P_2$), συνεχίζει προς την ίδια κατεύθυνση. Όταν εντοπίζει μείωση ισχύος, αλλάζει φορά.

Στα σημεία A και B φαίνεται η φάση όπου ο αλγόριθμος ταλαντώνεται γύρω από το σημείο P_m. Μεταβάλλει την τάση λίγο πάνω και λίγο κάτω από το V_m και παρατηρεί τη διαφορά στην ισχύ, χωρίς να 'κλειδώνει' ποτέ ακριβώς στο MPP. Αυτή η συνεχής ταλάντωση είναι αναμενόμενη συμπεριφορά του P&O και επηρεάζει ελαφρώς την απόδοση, αλλά επιτρέπει την προσαρμογή σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.[17]

3.3.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ P&O



Εικόνα 8 : Διάγραμμα ροής αλγόριθμου

Πηγή : https://www.ajer.org/papers/v2(12)/ZT212402408.pdf

Το παραπάνω διάγραμμα ροής απεικονίζει τη λογική λειτουργίας του αλγορίθμου Perturb and Observe (P&O), ο οποίος χρησιμοποιείται σε φορτιστές MPPT για την εύρεση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPP) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Ανάλυση Βημάτων

Start

Έναρξη λειτουργίας του αλγορίθμου.

Sense V(k), I(k)

Μέτρηση της στιγμιαίας τάσης και ρεύματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

P(k) - P(k-1) = 0

Ελέγχει αν η ισχύς έχει αλλάξει σε σχέση με την προηγούμενη μέτρηση.

P(k) - P(k-1) > 0
Αν η ισχύς αυξήθηκε, εξετάζει αν η μεταβολή της τάσης ήταν θετική ή αρνητική.

V(k) - V(k-1) > 0
Αν η τάση αυξήθηκε και η ισχύς επίσης, τότε συνεχίζει την αύξηση της τάσης (Increase Vref).

V(k) - V(k-1) < 0
Αν η τάση μειώθηκε και η ισχύς αυξήθηκε, συνεχίζει να μειώνει την τάση (Decrease Vref).

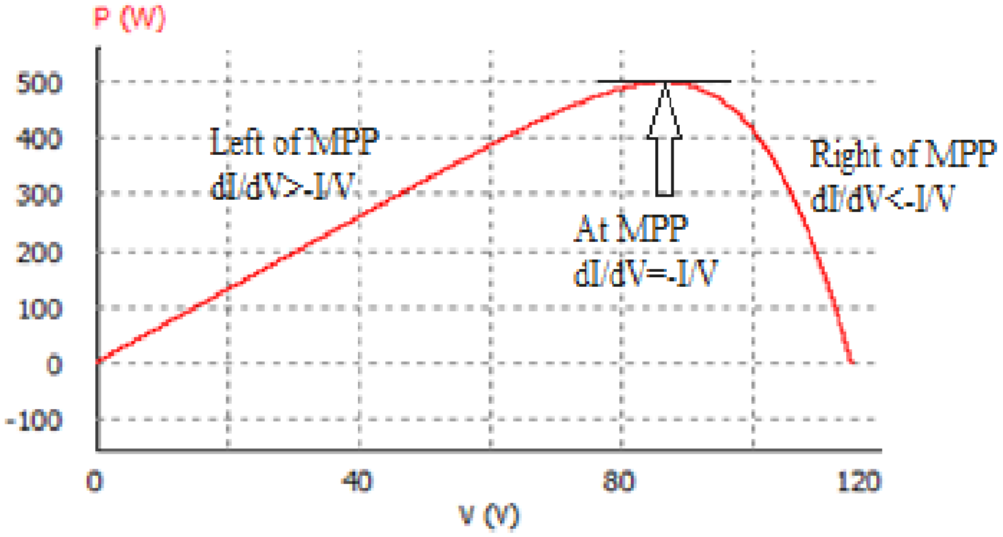
P(k) - P(k-1) < 0
Αν η ισχύς μειώθηκε, τότε αντιστρέφει την κατεύθυνση της μεταβολής τάσης.

Return
Τερματισμός του τρέχοντος κύκλου και επανάληψη.[17]

3.3.4 Incremental Conductance (Αλγόριθμος Αυξητικής Αγωγιμότητας) :

Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στη μέτρηση της καμπύλης ισχύος ως προς την τάση (dP/dV). Γνωρίζοντας ότι στη μέγιστη ισχύ ισχύει η παράγωγος της ισχύος dP/dV=0 (ή ισοδύναμα ότι η διαφορική αγωγιμότητα dI/dV είναι ίση με την αρνητική στιγμιαία αγωγιμότητα -I/V), ο αλγόριθμος IC συγκρίνει την αυξητική αγωγιμότητα με τη στιγμιαία αγωγιμότητα του φωτοβολταϊκού. Αν το σύστημα δεν έχει φτάσει στο MPP, η σύγκριση αυτή δείχνει σε ποια πλευρά του MPP βρίσκεται η λειτουργία (δεξιά ή αριστερά) και ο ελεγκτής προσαρμόζει αναλόγως την τάση προς τη σωστή κατεύθυνση, χωρίς να απαιτείται συνεχής ταλάντωση γύρω από το MPP. Μόλις επιτευχθεί το MPP ο αλγόριθμος μπορεί να σταματήσει τις μεταβολές. Το πλεονέκτημα του IC είναι η υψηλότερη ακρίβεια και ταχύτερη ανταπόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας σε σχέση με τον P&O, καθώς και η εξάλειψη των ταλαντώσεων στο σημείο μέγιστης ισχύος. Το μειονέκτημα του είναι η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα υλοποίησης συγκριτικά με τον απλούστερο P&O.[17]

3.3.5 Καμπύλη Ισχύος (P–V) και Παράγωγος



Εικόνα 9 : Καμπύλη Τάσης – Ισχύος

Πηγή : https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8776

Η παραπάνω γραφική απεικόνιση δείχνει την χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος–τάσης (P–V) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Καθώς η τάση (V) αυξάνεται, η παραγόμενη ισχύς (P = V × I) αυξάνεται μέχρι να φτάσει σε ένα μέγιστο σημείο – το Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point – MPP).

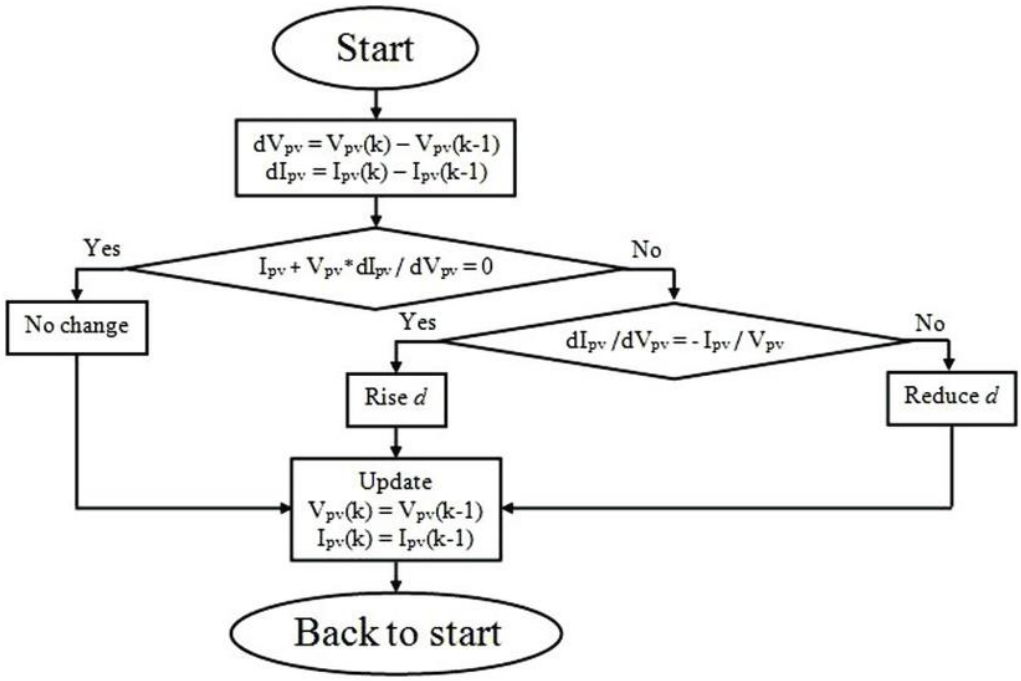
Η μαθηματική έννοια της παράγωγου dP/dV εκφράζει τον ρυθμό μεταβολής της ισχύος ως προς την τάση. Δηλαδή, πόσο αλλάζει η ισχύς όταν κάνουμε μια πολύ μικρή μεταβολή στην τάση. Ο αλγόριθμος IC αξιοποιεί αυτό το χαρακτηριστικό για να εντοπίσει το MPP.

Από την σχέση P = V·I, προκύπτει ότι:
dP/dV = I + V·(dI/dV).

Στο MPP, η ισχύς είναι μέγιστη ⇒ dP/dV = 0 ⇒ dI/dV = –I/V.

Άρα:
- Αν dI/dV > –I/V ⇒ το πλαίσιο λειτουργεί αριστερά του MPP ⇒ πρέπει να αυξήσει την τάση.
- Αν dI/dV < –I/V ⇒ το πλαίσιο είναι δεξιά του MPP ⇒ πρέπει να μειώσει την τάση.
- Αν dI/dV = –I/V ⇒ το πλαίσιο βρίσκεται στο MPP ⇒ δεν απαιτείται καμία μεταβολή.

3.3.6 Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου IC – Βήμα προς Βήμα



Εικόνα 10 : Διάγραμμα ροής Αλγορίθμου

Πηγή : **https://www.ajer.org/papers/v2(12)/ZT212402408.pdf**

Το παραπάνω διάγραμμα ροής παρουσιάζει την ακολουθία ενεργειών του αλγορίθμου Incremental Conductance.

Εκκίνηση (Start):
Ο αλγόριθμος ξεκινά την λειτουργία του.

Υπολογισμός μεταβολών τάσης και ρεύματος:
Υπολογίζονται οι διαφορές τάσης και ρεύματος μεταξύ της τρέχουσας και της προηγούμενης μέτρησης:
$dV = V(k) – V(k–1)$, $dI = I(k) – I(k–1)$

Έλεγχος συνθήκης MPP:
Αν ισχύει: $I + V \cdot (dI/dV) = 0$, τότε το πλαίσιο βρίσκεται στο MPP ⇒ καμία αλλαγή.

Έλεγχος για αριστερά του MPP:
Αν $dI/dV > –I/V$ ⇒ είμαστε πριν το MPP ⇒ αυξάνουμε την τάση αναφοράς Vref.

Έλεγχος για δεξιά του MPP:
Αν $dI/dV < –I/V$ ⇒ είμαστε μετά το MPP ⇒ μειώνουμε την τάση αναφοράς Vref.

Ενημέρωση μετρήσεων:
Καταχωρούνται οι νέες τιμές τάσης και ρεύματος για τον επόμενο κύκλο.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς ώστε ο ελεγκτής να ακολουθεί τις μεταβολές στην καμπύλη ισχύος και να προσαρμόζεται ανάλογα για μέγιστη ενεργειακή απόδοση.[17]

3.3.7 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ MPPT

Οι MPPT φορτιστές προσφέρουν μια σειρά από **πλεονεκτήματα**

- **Μέγιστη ενεργειακή απόδοση :** Μπορούν να αξιοποιήσουν την ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απόδοση μετατροπής συχνά πάνω από 90-95 %. Σε βέλτιστες συνθήκες η συγκομιδή ενέργειας μπορεί να είναι έως και 30% υψηλότερη από εκείνη του PWM.
- **Λειτουργία με υψηλότερη τάση PV:** Επιτρέπουν τη σύνδεση φωτοβολταϊκών σε σειρά με τάσεις πολύ υψηλότερες από την τάση της μπαταρίας, αφού ο μετατροπέας μειώνει και προσαρμόζει την τάση αυτή. Έτσι ένα σύστημα μπορεί να έχει δύο ή περισσότερα πλαίσια σε σειρά για καλύτερη απόδοση χωρίς να σπαταλάτε ενέργεια σε θερμότητα, κάτι που δεν είναι εφικτό σε έναν PWM
- **Καλύτερη απόδοση σε ψυχρό κλίμα και μεταβολές φωτισμού:** Σε χαμηλές θερμοκρασίες η τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc) των πλαισίων αυξάνεται δίνοντας περιθώριο στον MPPT να αντλήσει επιπλέον ισχύ πράγμα που τους καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικούς σε ψυχρά κλίματα. Επίσης σε συνθήκες με μεταβαλλόμενη ηλιοφάνεια, ο MPPT προσαρμόζεται για να διατηρήσει το πλαίσιο κοντά στο MPP, αποδίδοντας καλύτερα από τον στατικό χαρακτήρα ενός PWM.
- **Βελτιστοποίηση φόρτισης σε χαμηλή στάθμη μπαταρίας:** Οι MPPT τείνουν να παρέχουν μεγαλύτερο όφελος όταν η μπαταρία είναι σχετικά αποφορτισμένη, διότι

μπορούν να αντλήσουν το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να δώσουν τα πλαίσια(σε υψηλότερη τάση) και να το μετατρέψουν για να φορτίσουν ταχύτερα την μπαταρία. [18]

Τα βασικά τους **μειονεκτήματα** είναι τα εξής

- **Υψηλότερο κόστος:** Λόγω της πολυπλοκότητας τους (περισσότερα ηλεκτρονικά, μετατροπέας, κ.λπ.) οι MPPT είναι ακριβότεροι και συχνά το κόστος αρκετά μεγαλύτερο από εκείνο του PWM ίδιας ισχύος.
- **Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και θερμότητα:** Περιέχουν περισσότερα εξαρτήματα που ενδέχεται να παρουσιάσουν βλάβη ή φθορά μακροπρόσθεσμα π.χ. η διάρκεια ζωής τους μπορεί να είναι λίγο μικρότερη από έναν απλούστερο PWM λόγω του αριθμού εξαρτημάτων και της θερμότητας που παράγουν).
- **Διαστάσεις και πολυπλοκότητα εγκατάστασης**: Οι MPPT ρυθμιστές είναι συνήθως μεγαλύτεροι σε μέγεθος και απαιτούν λίγο πιο σύνθετη εγκατάσταση.
- **Ηλεκτρομαγνητικός παλμός**: Η λειτουργία μετατροπής υψηλής συχνότητας μπορεί να προκαλέσει θόρυβο RF στο σύστημα αν και τα σύγχρονα μοντέλα περιλαμβάνουν φίλτρα για την ελαχιστοποίηση του προβλήματος.[18]

3.3.8 Εφαρμογές των MPPT

Οι φορτιστές MPPT χρησιμοποιούνται κατά προτίμηση σε μεγαλύτερα ή απαιτητικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα μεσαίας και μεγάλης κλίμακας όπως κατοικίες, αγροικίες, τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί όπου η μέγιστη συλλογή ενέργειας είναι σημαντική.

Σε περιπτώσεις όπου τα φωτοβολταϊκα πλαίσια έχουν υψηλή τάση ως συστοιχία για παράδειγμα πολλαπλά πλαίσια σειρά ή όταν χρησιμοποιούνται σύγχρονα πλαίσια υψηλής ισχύος 60 70 κυττάρων όπου η βέλτιστη τάση λειτουργίας είναι 30v με 36v για φόρτιση συσσωρευτών 12/24v.

Σε περιοχές με ψυχρό κλίμα ή συχνές μεταβολές και μερική σκίαση όπου η επιπλέον ενέργεια που αποδίδει ένας MPPT βελτιώνει σημαντικά τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος.[16]

3.4 Φορτιστης PWM - Αρχή λειτουργίας και Χαρακτηριστικά

Ο φορτιστής PWM (Pulse Width Modulation – Διαμόρφωση Εύρους Παλμού) αποτελεί την απλούστερη και πιο οικονομική μορφή ρυθμιστή φόρτισης για φωτοβολταϊκά συστήματα. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση ενός ηλεκτρονικού διακόπτη υψηλής συχνότητας, ο οποίος συνδέει και αποσυνδέει επανειλημμένα το φωτοβολταϊκό πλαίσιο από τη μπαταρία. Μέσω αυτής της διακοπτόμενης σύνδεσης, ρυθμίζεται το ρεύμα φόρτισης, διατηρώντας παράλληλα την τάση της μπαταρίας σε ασφαλή επίπεδα.[15]

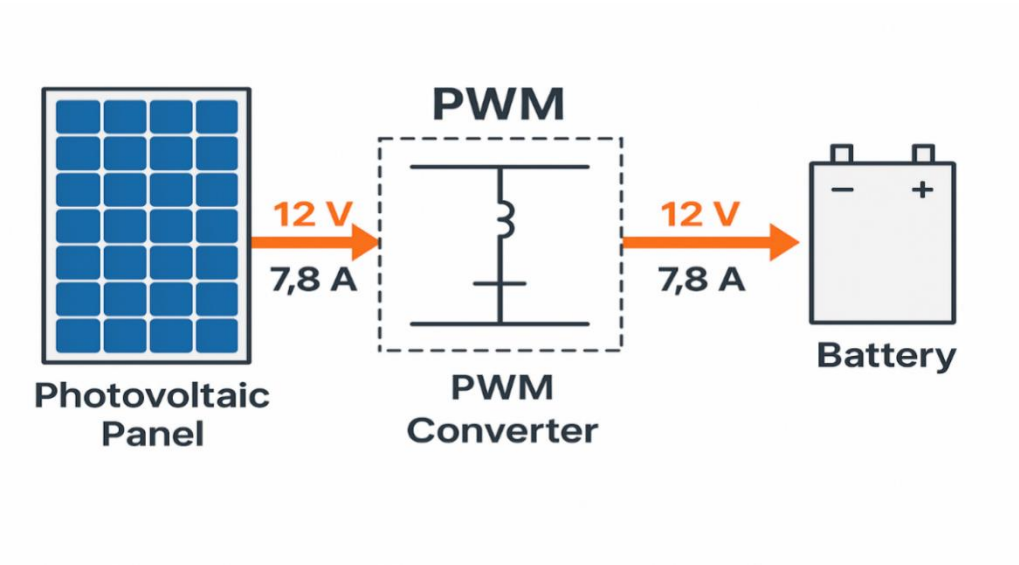
Καθώς η μπαταρία πλησιάζει το επίπεδο πλήρους φόρτισης, ο φορτιστής PWM μειώνει σταδιακά τον χρόνο κατά τον οποίο το πλαίσιο παραμένει συνδεδεμένο (duty cycle). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται “διαμόρφωση πλάτους παλμού” και εξασφαλίζει την αποφυγή υπερφόρτισης.

Ωστόσο, λόγω της **άμεσης σύνδεσης** του πλαισίου με τη μπαταρία, η τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης «υποχρεώνεται» να ακολουθήσει την τάση της μπαταρίας. Αυτό σημαίνει ότι το πλαίσιο **δεν λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος του** εκτός και αν η τάση της μπαταρίας είναι πολύ κοντά στο Vmp του πλαισίου.

Ως αποτέλεσμα, ένα σημαντικό μέρος της διαθέσιμης ισχύος μπορεί να μην αξιοποιείται. Για παράδειγμα, αν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει σημείο μέγιστης ισχύος στα 18 V και χρησιμοποιείται για τη φόρτιση μιας μπαταρίας 12 V μέσω PWM, τότε όταν η μπαταρία βρίσκεται στα 13–14 V, το πλάισιο αναγκάζεται να λειτουργεί σε αυτή τη χαμηλότερη τάση και συνεπώς παράγει μειωμένη ισχύ, σε σχέση με τη θεωρητική του απόδοση.[16]

3.4.1 Διάγραμμα Συστήματος PWM

Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τη λειτουργία ενός συστήματος PWM με φωτοβολταϊκό πλαίσιο και μπαταρία 12V:



Εικόνα 11 : Διάγραμμα λειτουργίας PWM

Πηγή : : https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers

3.4.2 Ανάλυση Παραδείγματος PWM

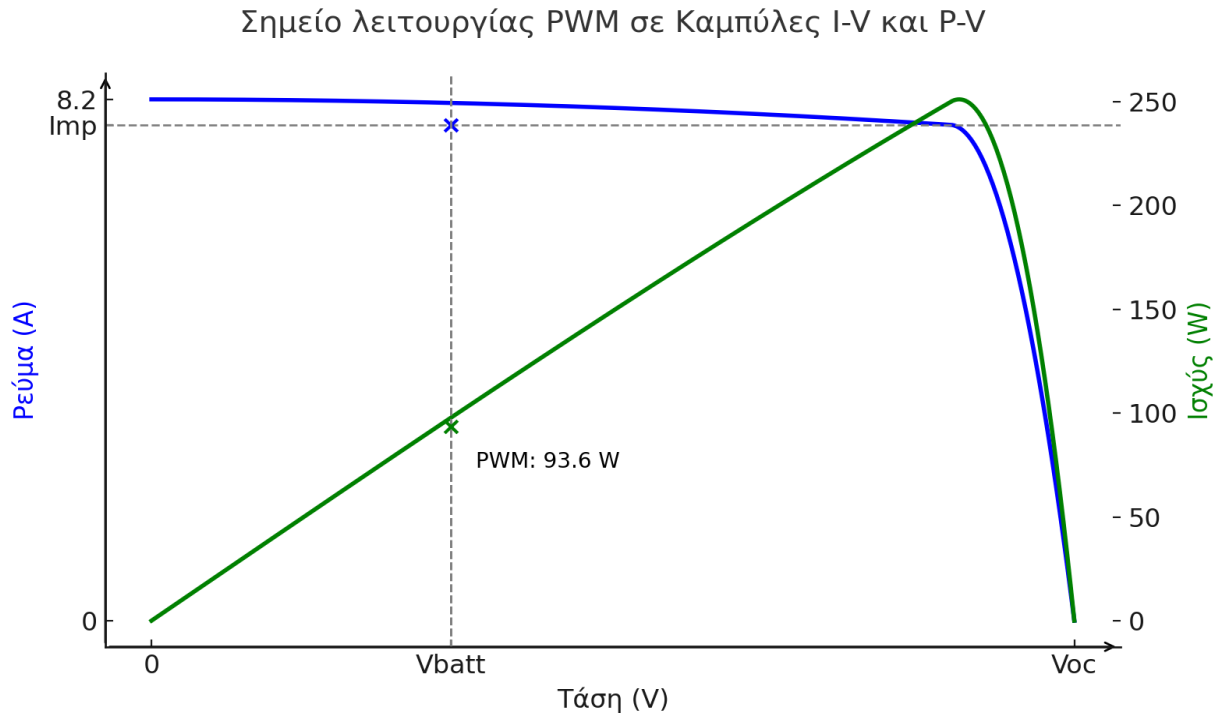
Στο παραπάνω σύστημα, χρησιμοποιείται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ισχύος 250 W, με χαρακτηριστικά:
- Τάση σημείου μέγιστης ισχύος (Vmp) = 32 V
- Ρεύμα σημείου μέγιστης ισχύος (Imp) = 7,8 A

Ωστόσο, όταν το πλαίσιο συνδεθεί με έναν φορτιστή PWM, η λειτουργία του διαφοροποιείται σημαντικά.
Ο φορτιστής PWM συνδέει άμεσα την έξοδο του πλαισίου με τη μπαταρία 12 V. Αυτό σημαίνει ότι η τάση του πλαισίου δεν μπορεί να διατηρηθεί στο ιδανικό του σημείο (32 V), αλλά «τραβιέται» προς την τάση της μπαταρίας – περίπου 12 V.

Η ισχύς που παράγεται σε αυτή την περίπτωση δεν είναι πλέον 250 W αλλά υπολογίζεται ως:
P = V × I = 12 V × 7,8 A = 93,6 W

Έτσι, αξιοποιείται μόνο περίπου το 37% της διαθέσιμης ισχύος του πλαισίου, ενώ η υπόλοιπη μένει ανεκμετάλλευτη. Αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των φορτιστών PWM, ειδικά όταν η τάση λειτουργίας των πλαισίων είναι πολύ υψηλότερη από την τάση της μπαταρίας.

3.4.3 Καμπύλες I-V & P-V



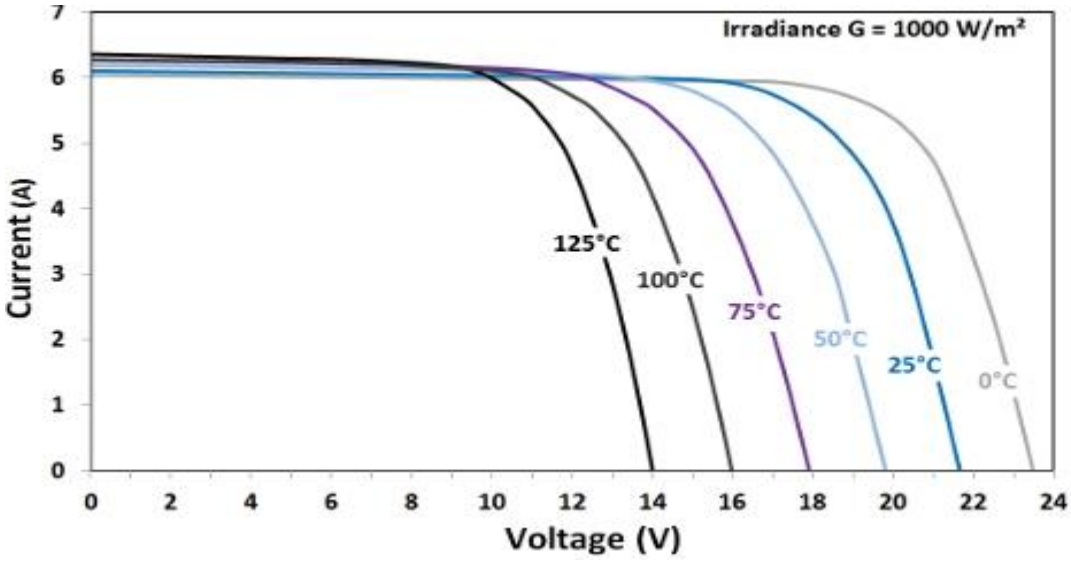
Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου υπό ρύθμιση PWM. Η καμπύλη ρεύματος–τάσης (I–V) παρουσιάζεται με μπλε χρώμα, ενώ η καμπύλη ισχύος–τάσης (P–V) με πράσινο. Το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) επισημαίνεται στα 32 V και 250 W.

Η λειτουργία PWM υποχρεώνει το πλαίσιο να λειτουργεί σε τάση κοντά στα 12 V, παράγοντας ισχύ περίπου 93.6 W — πολύ κάτω από τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ. Η διαφορά αυτή είναι ορατή στο διάγραμμα και τονίζει τη σημασία της χρήσης MPPT φορτιστών σε συστήματα υψηλών απαιτήσεων. [16]

3.4.4 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των PWM

Τα **πλεονεκτήματα** των PWM ρυθμιστών είναι τα εξής

- **Χαμηλό κόστος και απλότητα**: Οι PWM είναι πολύ οικονομικοί και απλοί στην κατασκευή, χωρίς περίπλοκα ηλεκτρονικά. Αυτό τους κάνει ιδανικούς όταν ο προϋπολογισμός είναι περιορισμένος ή για πολύ μικρά συστήματα
- **Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής**: Με λιγότερα εξαρτήματα και απλό κύκλωμα, παρουσιάζουν μικρότερη πιθανότητα βλάβης σε βάθος χρόνου. Δεν παράγουν σημαντική θερμότητα λειτουργούν κατά βάση ως διακόπτες. Έτσι μπορούν να επιτύχουν μεγάλη διάρκεια ζωής σε κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας.
- **Απόδοση σε θερμά κλίματα**: Σε περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες η διαφορά απόδοσης μεταξύ PWM και MPPT μειώνεται καθώς η τάση MPP των πλαισίων πλησιάζει περισσότερο την τάση φόρτισης της μπαταρίας σε ζέστη. Σε υποτροπικά/τροπικά κλίματα, η συνολική συγκομιδή ενέργειας από έναν PWM μπορεί υπό προϋποθέσεις να προσεγγίσει αυτήν ενός MPPT.[15]



Εικόνα 12 : Διάγραμμα απόδοσης πλαισίου ανάλογα με την θερμοκρασία

Πηγή : **[https://www.victronenergy.com/upload/documents/Technical-Information-Which-solar-charge-controller-PWM-or-MPPT.pdf**

3.4.5 Τα μειονεκτήματα των φορτιστών PWM είναι τα εξής

- **Περιορισμένη αποδοτικότητα**: Δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν πλήρως την ισχύ των φωτοβολταϊκών όταν η τάση MPP του πλαισίου είναι υψηλότερη από την τάση φόρτισης. Συχνά η πραγματική απόδοση φόρτισης περιορίζεται στο 70 με 80 % της διαθέσιμης ισχύος του πλαισίου ανάλογα με τις συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι σε μεγάλες αποκλίσεις τάσης οι απώλειες ενέργειας είναι σημαντικές μπορεί να χαθεί 20-30% ή και περισσότερο από την ενέργεια του πλαισίου.
- **Μη δυνατότητα αύξησης ρεύματος**: Επειδή ο PWM δεν περιλαμβάνει μετατροπέα DC-DC, δεν μπορεί να "μετατρέψει" την επιπλέον τάση σε ρεύμα. Το ρεύμα που λαμβάνει η μπαταρία είναι ουσιαστικά το ίδιο με το ρεύμα του πλαισίου σε αντίθεση με έναν MPPT που μπορεί να αυξήσει το ρεύμα φόρτισης μέσω μετατροπής ισχύος.
- **Περιορισμοί κλίμακας και ευελιξίας**: Οι PWM απαιτούν το πλαίσιο και η μπαταρία να έχουν παρόμοια ονομαστική τάση για να λειτουργούν αποδοτικά. Σε μεγαλύτερα συστήματα αυτό δεν είναι πρακτικό για παράδειγμα σε ένα σύστημα με 24v πολλαπλά πλαίσια θα πρέπει τα πλαίσια να συνδεθούν όλα παράλληλα ώστε η τάση κάθε πλαισίου να παραμένει γύρω στα 36v-συμβατή με την μπαταρία των 24v. Αυτή η παράλληλη σύνδεση οδηγεί σε πολύπλοκη καλωδίωση, αυξημένες απώλειες ρεύματος και υψηλότερο κόστος σε αγωγούς και προστατευτικά συστήματα.
- **Μειωμένη απόδοση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες**: Σε συνθήκες με συννεφιά η με μερική σκίαση όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται ενας PWM δεν μπορεί να προσαρμόζει το σημείο λειτουργίας απλώς παρέχει ότι ρεύμα μπορεί στη σταθερή τάση της μπαταρίας. Έτσι σε μη ομαλές συνθήκες οι PWM αφήνουν περισσότερη ενέργεια ανεκμετάλλευτη.[18]

3.4.6 Εφαρμογές PWM

Οι φορτιστές PWM αποτελούν καλή επιλογή κυρίως σε μικρά και απλά συστήματα, όπου οι συνθήκες είναι ευνοϊκές.

Σε μικρές εγκαταστάσεις όπως φωτισμός κήπου, αυτόνομα φανάρια, μικρά φωτοβολταϊκά σε τροχόσπιτα η βάρκες όπου χρησιμοποιούνται 1 με 2 πλαίσια με κατάλληλη μπαταρία. Για παράδειγμα ένα τροχόσπιτο με ένα πλαίσιο 12V με Voc 21v και Vmp 18V και μπαταρία 12V η χρήση ρυθμιστή τύπου PWM είναι επαρκής επειδή η τάση λειτουργίας του πλαισίου είναι κοντά στην τάση της μπαταρίας η απώλεια ισχύος θα είναι μικρή.

Όταν ο προϋπολογισμός είναι πολύ περιορισμένος και η απώλεια ενέργειας του πλαισίου δεν θεωρείται κρίσιμη. Αν κάποιος διαθέτει ένα μικρό πλαίσιο και θέλει απλώς να διατηρεί μια μπαταρία φορτισμένη οι φθηνοί PWM είναι η προφανής λυση.

Σε εφαρμογές όπου η αξιοπιστία και η απλότητα υπερισχύουν της απόδοσης.[16]

3.5 Σύγκριση Τεχνολογιών MPPT και PWM

Πίνακας Σύγκρισης

Κριτήριο	**MPPT Φορτιστής**	**PWM Φορτιστής**
Απόδοση	90–99%. Βελτιστοποιεί συνεχώς την ισχύ εξόδου του πλαισίου.	70–85%. Εξαρτάται από την τάση μπαταρίας και την ηλιακή ακτινοβολία.
Κόστος	Υψηλό. Ακριβότερος λόγω εξελιγμένων κυκλωμάτων και μετατροπέων.	Χαμηλό. Οικονομικός και απλός στην εγκατάσταση.
Πολυπλοκότητα Συστήματος	Πολύπλοκος – περιλαμβάνει DC-DC μετατροπέα και λογισμικό εντοπισμού MPP.	Απλός – λειτουργεί ως διακόπτης που ρυθμίζει την τάση απευθείας.
Απαιτήσεις Συντήρησης	Χαμηλή, αλλά με περισσότερα εξαρτήματα και ανάγκη παρακολούθησης.	Ελάχιστη – απλό κύκλωμα, λιγότερα εξαρτήματα.
Κατάλληλες Εφαρμογές	Μεγάλες εγκαταστάσεις, ψυχρά ή μεταβαλλόμενα κλίματα, υψηλή παραγωγή.	Μικρά αυτόνομα συστήματα, τροχόσπιτα, φωτισμός, θερμά κλίματα.
Ανταπόκριση σε Κλιματικές Μεταβολές	Προσαρμόζεται άμεσα σε σκιάσεις, σύννεφα και αλλαγές θερμοκρασίας.	Περιορισμένη δυνατότητα προσαρμογής – λιγότερο αποδοτικός σε σκιά και κρύο.

Τελικό Συμπέρασμα

Η σύγκριση μεταξύ ρυθμιστών φόρτισης MPPT και PWM καταδεικνύει ότι κάθε τεχνολογία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα ανάλογα με το μέγεθος, το κόστος και τις συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι MPPT προσφέρουν υψηλότερη απόδοση αξιοποιώντας στο μέγιστο τη διαθέσιμη ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων και προσαρμόζονται δυναμικά σε μεταβαλλόμενες συνθήκες όπως θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ή σκίαση. Είναι ιδανικοί για μεγάλες εγκαταστάσεις και περιοχές με ψυχρό ή ασταθές κλίμα.

Αντίθετα, οι PWM ρυθμιστές χαρακτηρίζονται από απλότητα, χαμηλό κόστος και επάρκεια σε μικρές εφαρμογές με σταθερή ηλιοφάνεια, όπως τροχόσπιτα ή φορητά φωτοβολταϊκά. Αν και η απόδοσή τους είναι χαμηλότερη, σε θερμά κλίματα όπου η τάση MPP των πλαισίων πλησιάζει

την τάση φόρτισης της μπαταρίας, οι απώλειες μειώνονται και η διαφορά απόδοσης με τους MPPT περιορίζεται.

Η τελική επιλογή μεταξύ των δύο τεχνολογιών θα πρέπει να βασίζεται στη φύση της εφαρμογής, το κόστος εγκατάστασης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας. Οι MPPT υπερτερούν σε ενεργειακή απόδοση και ευελιξία, ενώ οι PWM παραμένουν μια αξιόπιστη λύση για απλές και οικονομικές υλοποιήσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^{Ο}

4.1 Συσσωρευτές σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκα Συστήματα

Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκα συστήματα οι συσσωρευτές (μπαταρίες) είναι υπεύθυνες για την αποθήκευση της ενέργειας που παράγουν τα ηλιακά πλαίσια όταν η ζήτηση είναι χαμηλότερη από την παραγωγή και της παροχής ενέργειας όταν η ηλιακή παραγωγή είναι ανεπαρκής (πχ. Νύχτα η σεννεφία). Με άλλα λόγια, οι μπαταρίες εξομαλύνουν την παραγωγή ενέργειας του συστήματος και παρέχουν εφεδρική τροφοδοσία όταν δεν υπάρχει άλλη πηγή. Τα βασικά οφέλη από τη χρήση συσσωρευτών σε αυτόνομο σύστημα περιλαμβάνουν:

- **Εφεδρική ισχύ**: Σε περίπτωση διακοπής του δικτύου, οι μπαταρίες μπορούν να διατηρήσουν την παροχή ρεύματος σε φορτία όπως ο φωτισμός.
- **Διαχείριση αιχμών**: Επιτρέπουν την εκμετάλλευση της πλεονάζουσας ενέργειας (π.χ. φόρτιση σε ώρες εκτός αιχμής) και την μείωση των αιχμών ζήτησης κατά τις ώρες υψηλής χρέωσης.

Έτσι, οι συσσωρευτές εξασφαλίζουν αυτονομία και αξιοπιστία του συστήματος. Σε διασυνδεδεμένα με δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα η ανάγκη για μπαταρία δεν υπάρχει καθώς η πλεονάζουσα ενέργεια επιστρέφεται στο δίκτυο.[19]

4.2 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών

4.2.1 Χωρητικότητα (Ah – Wh): Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας είναι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αποδώσει υπό καθορισμένες συνθήκες. Μετράτε σε αμπερώρες (Ah) ή βατώρες (Wh) και εξαρτάται κυρίως από:

- Το **ενεργό υλικό** δηλαδή τις χημικές ουσίες μέσα στα ηλεκτρόδια που συμμετέχουν άμεσα στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις π.χ. λίθιο,γραφίτης

- Το **μέγεθος των ηλεκτροδίων**, δηλαδή την επιφάνεια και τον όγκο των υλικών όπου πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις. Όσο μεγαλύτερα τα ηλεκτρόδια τόσο περισσότερη ενέργεια μπορούν να αποθηκεύσουν.[20]

Στην πράξη η πραγματική χωρητικότητα μιας μπαταρίας μειώνεται με την πάροδο του χρόνου από την γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας και τις χαμηλές θερμοκρασίες.

4.2.2 Ονομαστική Τάση: Η ονομαστική τάση μιας μπαταρίας είναι η τυπική ή μέση ηλεκτρική τάση που αποδίδει κάθε κύτταρο ή στοιχείο κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας δηλαδή ούτε πλήρως φορτισμένο ούτε πλήρως εκφορτισμένο.

4.2.3 Μπαταρίες μολύβδου – οξέος

Κάθε στοιχείο (κύτταρο) έχει ονομαστική τάση περίπου 2,0 - 2,1 V.

Όταν είναι σχεδόν αποφορτισμένο η τάση του κυττάρου πέφτει περίπου στα 1,75 V.

Για να δημιουργηθεί μια μπαταρία 12V συνδέονται 6 κύψελίδες σε σειρά (6 x 2V =12 V).

4.2.4 Μπαταρίες λιθίου τύπου LiFePO4:

Κάθε κύτταρο έχει ονομαστική τάση περίπου 3,2V

Επομένως για να φτάσουμε στα 12 V απαιτούνται 4 κύψελιδες σε σειρά 4 x 3,2V = 12,8V που θεωρείται το ισοδύναμο των 12V συστημάτων μολύβδου.[21]

Οι κυψελίδες χρησιμοποιούνται σε σειρά γιατί αυξάνει την τελική τάση της μπαταρίας, αντίθετα όταν θέλουμε να αυξήσουμε την χωρητικότητα προσθέτουμε κύψελίδες παράλληλα.

4.2.5 Βάθος Εκφόρτισης (DoD – Depth of Discharge)

Το βάθος εκφόρτισης εκφράζει το ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας μιας μπαταρίας που έχει χρησιμοποιηθεί, ξεκινώντας από την πλήρη φόρτιση.

Παράδειγμα:

Αν μια μπαταρία έχει χωρητικότητα 100Ah και χρησιμοποιήσουμε τα 50Ah, τότε το DoD είναι 50%, αν την αποφορτίσουμε πλήρως το DoD θα είναι 100%

Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης εξαρτάται απο:

- Τον τύπο της μπαταρίας
- Τις ανάγκες του συστήματος αυτονομία, συχνότητα κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.

Διαφορές ανάλογα με την τεχνολογία:

Στις μπαταρίες μολύβδου – οξέος συνιστάται να περιορίζεται το DoD περίπου στο 50% ώστε να διατηρείται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αντίθετα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου όπως LiFePO4 μπορούν εύκολα να φτάσουν χωρίς πρόβλημα σε 80 – 100 % DoD.

Το βάθος εκφόρτισης είναι σημαντικός παράγοντας για την απόδοση και τη διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας, η σωστή διαχείριση του βοηθά στην αξιοπιστία και την μακροχρόνια λειτουργία του συστήματος.[22]

4.2.6 Κυκλοι Ζωης Μπαταρίας

Οι κύκλοι ζωής μιας μπαταρίας είναι ο αριθμός που αναφέρονται στον αριθμό φόρτισης και εκφόρτισης που μπορεί ναι εκτελέσει μια μπαταρία πριν η χωρητικότητα της μειωθεί στο 80% της αρχικής τιμής.

- Ένας κύκλος ζωής αντιστοιχεί σε μια φόρτιση και μια εκφόρτιση που αντιστοιχούν συνολικά στο 100 % της χωρητικότητας δηλαδή 2 φόρες απο 50 % εκφόρτιση είναι ένας πλήρης κύκλος
- Ο αριθμός των κύκλων επηρεάζετε από το DoD όσο μεγαλύτερο το DoD δηλαδή πιο βαθιά εκφόρτιση τόσο λιγότερους κύκλους αντέχει η μπαταρία. Αντίθετα πιο μικρές εκφρορτίσεις αυξάνουν τη διάρκεια ζωής.
- Οι Μπαταρίες μολύβδου οξέος έχουν 500 – 1000 κύκλους ζωής ενώ οι μπαταρίες ιόντων λιθίου από 2000 – 8000 κύκλους ζωής.

Η ζωή μιας μπαταρίας δεν μετριέται σε χρόνια αλλά σε κύκλους η σωστή διαχείριση του βάθους εκφόρτισης μπορεί να παρατείνει σημαντικά τον χρόνο λειτουργίας της.[23]

4.2.7 Απόδοση Ενέργειας

Καμία μπαταρία δεν είναι τέλεια ένα μέρος της ενέργειας χάνεται κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση.

Μπαταρίες μολύβδου – οξέος

- Αποδοτικότητα φορτίου 85% (ποσοστό φορτιού που ανακτάται σε σχέση με αυτό που προστέθηκε)
- Ενεργειακή απόδοση 70 % (Λόγω απωλειών όπως θερμότητα)
- Η απόδοση μειώνεται περισσότερο όταν υπάρχει υπερφόρτιση, υπερτάσεις η ηλεκτρόλυση.[22]

Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου

- Παρουσιάζουν πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση συνήθως 95% η περισσότερο χάρη σε πιο αποτελεσματικές χημικές αντιδράσεις και χαμηλές εσωτερικές απώλειες.

4.2.8 Συντήρηση & Αυτοεκφόρτιση

Οι συμβατικές μπαταρίες μολύβδου – οξέος χρειάζονται τακτική συντήρηση όπως

- Έλεγχος στάθμης νερού
- Συμπλήρωση υγρών λόγω εξάτμισης από ηλεκτρόλυση [22]

Οι σφραγισμένες μπαταρίες τύπου VRLA (AGM η gel)

- Δεν απαιτούν προσθήκη νερού και δεν είναι εντελώς ανενεργές υπάρχει χαμηλό ποσοστό αυτόεκφόρτισης με την πάροδο του χρόνου.

4.2.9 Αυτόεκφόρτιση

- Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μια μπαταρία χάνει μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας της με την πάροδο του χρόνου όταν αυτή παραμένει αχρησιμοποίητη χωρίς να είναι συνδεμένη σε κάποιο φορτίο, η χαμένη ενέργεια είναι υψηλότερη στις κλασικές μολύβδου – οξέος χάνουν περίπου 3-15 % τον μήνα, μικρότερη στους τύπους gel/AGM 1-3 % τον μηνα, πολύ χαμηλή στις μπαταρίες ιόντων λιθίου <1% που επιπλέον δεν απαιτούν συντήρηση.

Οι μπαταρίες λιθίου υπερτερούν σημαντικά σε απόδοση, απαιτήσεις συντήρησης και σταθερότητα σε βάθος χρόνου σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες μολύβδου ειδικά όταν η χρήση είναι συνεχής.

4.3 Βασικές Τεχνολογίες Συσσωρευτών

4.3.1 Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος (Flooded)

Οι flooded μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι η παραδοσιακή και οικονομική λύση για φωτοβολταϊκά συστήματα. Αντέχουν σε εκφορτίσεις έως περίπου 50% της χωρητικότητάς τους. Ωστόσο απαιτούν συχνή συντήρηση, όπως έλεγχο και συμπλήρωση του νερού καθώς κατά τη φόρτιση δημιουργούνται αέρια που αυξάνουν την εσωτερική πίεση. Ο κύκλος ζωής τους είναι περιορισμένος (περίπου 500–1000 κύκλους στο 50% DoD). Επίσης έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή αποθηκεύουν σχετικά λίγη ενέργεια ανά μονάδα βάρους, και η απόδοσή τους μειώνεται σημαντικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.[23]

4.3.2 Μπαταρίες AGM (VRLA με Absorbent Glass Mat)

Οι μπαταρίες AGM είναι επίσης μολύβδου-οξέος, αλλά είναι σφραγισμένες και δεν απαιτούν συντήρηση, λόγω του ηλεκτρολύτη που συγκρατείται σε ένα στρώμα υαλοβάμβακα (Absorbent Glass Mat). Παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή σε κραδασμούς, έχουν υψηλή στιγμιαία απόδοση (δυνατότητα να παρέχουν μεγάλα ρεύματα σε μικρό χρονικό διάστημα) και είναι κατάλληλες για απαιτητικές εφαρμογές, όπως φωτοβολταϊκά και οχήματα. Ωστόσο, ο κύκλος ζωής τους είναι παρόμοιος με των flooded, περίπου 500 κύκλους στο 50% DoD.[23]

4.3.3 Μπαταρίες Gel (VRLA με τζελ ηλεκτρολύτη)

Οι μπαταρίες gel είναι μια ακόμη πιο εξελιγμένη εκδοχή των μπαταριών μολύβδου-οξέος. Ο ηλεκτρολύτης είναι στερεοποιημένος σε μορφή gel, παρέχοντας πλήρη σφράγιση και ακόμα καλύτερη αντοχή σε κραδασμούς. Έχουν χαμηλότερη αυτοεκφόρτιση και δεν απαιτούν συντήρηση. Ο κύκλος ζωής τους είναι μεγαλύτερος, περίπου 800–1000 κύκλους στο 50% DoD. Ωστόσο, είναι πιο ευαίσθητες σε υψηλά ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και σε υψηλές θερμοκρασίες.[23]

4.3.4 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου ($LiFePO_4$)

Οι μπαταρίες Li-ion (κυρίως $LiFePO_4$) αποτελούν σύγχρονη λύση που χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Διαθέτουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή αποθηκεύουν πολύ περισσότερη ενέργεια ανά βάρος ή όγκο σε σύγκριση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Δεν απαιτούν συντήρηση και έχουν μεγάλο κύκλο ζωής (περίπου 2000–8000 κύκλους στο 50% DoD), επιτρέποντας εκφορτίσεις (80–100% DoD) χωρίς σημαντική φθορά. Κάθε κύτταρο $LiFePO_4$ έχει τάση περίπου 3,2 V, και έτσι μια τυπική μπαταρία 12V αποτελείται από τέσσερις κυψελίδες σε σειρά. Η χρήση τους απαιτεί ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης (BMS) για να εξισορροπούνται οι κυψελίδες και να αποφεύγεται η υπερφόρτιση ή η υπερβολική εκφόρτιση. Το βασικό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος αγοράς και η μειωμένη απόδοση σε θερμοκρασίες κάτω από 0°C.[23]

4.4 Ρυθμιστές Φόρτισης PWM & MPPT και Σωστή Διαχείριση Φόρτισης

Οι ρυθμιστές φόρτισης MPPT&PWM ελέγχουν την διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας προστατεύοντας συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της διάρκειας της ζωής της.

Η σωστή φόρτισης μιας μπαταρίας είναι μια ελεγχόμενη και σταδιακή διαδικασία που εξασφαλίζει μακροχρόνια απόδοση και προστασία της.

Τα στάδια φόρτισης περιλαμβάνουν:

1. **Bulk**: Η αρχική φάση όπου η μπαταρία φορτίζεται με σταθερό ρεύμα μέχρι να φτάσει περίπου στο 80-90% της πλήρους φόρτισης.

2. **Absorption**: Στο συγκεκριμένο στάδιο η τάση ανεβαίνει και το ρεύμα μειώνεται επιτρέποντας στη μπαταρία να φτάσει στο 100% χωρίς φθορά.

3. **Float**: Η τελική φάση όπου η τάση είναι χαμηλή για να διατηρείται η μπαταρία πλήρως φορτισμένη αποφεύγοντας την υπερφόρτιση.

Οι σύγχρονοι ρυθμιστές έχουν λειτουργίες όπως εξισορρόπηση κυψελών που είναι χρήσιμες για μπαταρίες λιθίου διότι διατηρείται ομοιομορφία ανάμεσα στις κυψελίδες.

Τέλος ένας καλός φορτιστής προστατεύει την μπαταρία από:

Υπερφόρτιση, σταματώντας τη φόρτιση όταν ξεπεραστεί το όριο της τάσης

Εκφόρτιση, διακόπτοντας την παροχή ρεύματος όταν η τάση πέσει από συγκεκριμένο όριο.

Η ελλιπής ή εσφαλμένη φόρτιση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όπως φούσκωμα της μπαταρίας φθορά ηλεκτροδίων και πρόωρη μείωση της χωρητικότητας. Για αυτό η σωστή λειτουργία της είναι σημαντική για ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.[24] [22]

4.5 Διαστασιολόγηση των συσσωρευτών σε αυτόνομα συστήματα

Η σωστή επιλογή της μπαταρίας γίνεται βάση τις απαιτήσεις του αυτόνομου συστήματος οι βασικές παράμετροι είναι οι εξής:

1. **Κατανάλωση Ενέργειας (Wh/Ημέρα)**: Η ενέργεια που χρειάζονται τα φόρτια για να λειτουργήσει το αυτόνομα σύστημα

2. **Ημέρες αυτονομίας**: Πόσες μέρες θέλουμε να δουλέψει το σύστημα σε περιόδους χαμηλής ηλιοφάνειας

3. **Τάση Συστήματος**: Εξαρτάται απο την ισχύ του συστήματος, σε μικρότερα χρησιμοποιείται 12V ενώ σε μεγαλύτερα 24V η 48V για μείωση των ρευμάτων

4. **DoD - Βαθμός Επιτρεπόμενης Εκφόρτισης:** Είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να δημιουργηθεί για την μπαταρία.

5. Υπολογισμός χωρητικότητας

$$\text{Χωρητικότητα(Wh)} = \frac{\text{Ημερήσια Κατανάλωση} * \text{Ημέρες Αυτονομίας}}{\text{DoD} * \text{Απόδοση Μπαταρίας}}$$

Για παράδειγμα:

Κατανάλωση:5000 Wh/Ημέρα

Αυτονομία: 2 ημέρες

DoD: 50%

Απόδοση συστήματος: 85%

Τάση Συστήματος: 24V

Βήμα 1:

$$\text{Χωρητικότητα(Wh)} = \frac{5000 * 2}{0{,}5 * 0{,}85} = 23.529\text{Wh}$$

Βήμα 2:

$$\text{Χωρητικότητα(Ah)} = \frac{23.529}{24} = 980{,}4\text{Ah}$$

Άρα για το συγκεκριμένο σύστημα χρειαζόμαστε μπαταριές 980Ah 24V για 2 ημέρες αυτονομίας με κατανάλωση 5kWh/ημέρα.[25]

Συμπέρασμα

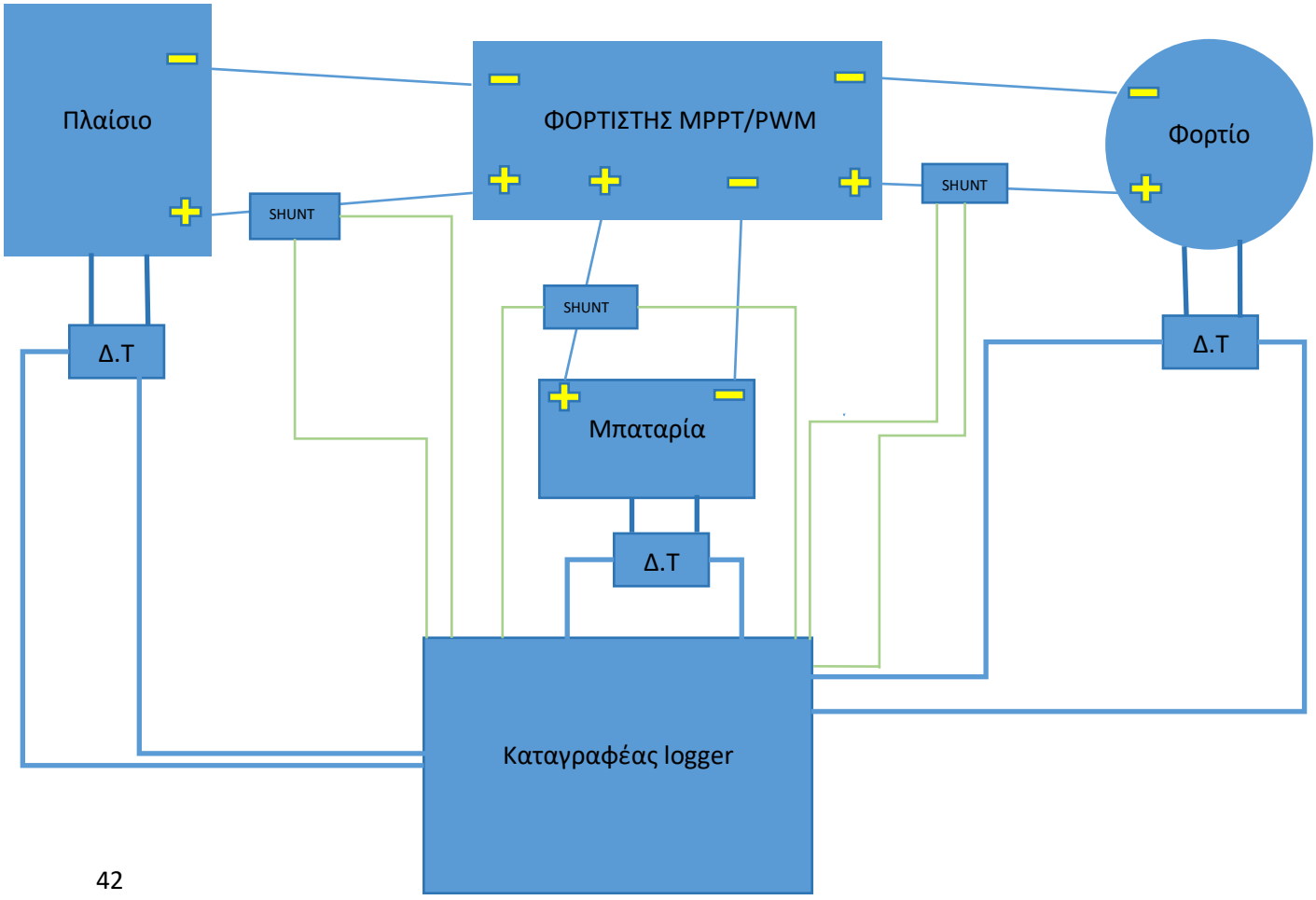
Ένα σωστά διαστασιολογημένο σύστημα χρησιμοποιεί μπαταρίες που καλύπτουν πλήρως τις ανάγκες κατανάλωσης για τις επιθυμητές ημέρες αυτονομίας. Αυτό εξασφαλίζει ενεργειακή επάρκεια και μακροχρόνια αξιοπιστία του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

5.1 ΕΝΕΡΓΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ MPPT & PWM

Στο κεφάλαιο 5ο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της συγκριτικής αξιολόγησης των δύο ρυθμιστών φόρτισης MPPT και PWM στο πείραμα. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να προσφέρει μια πλήρη και τεκμηριωμένη εικόνα της απόδοσης των δύο τεχνολογιών υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων και γραφημάτων ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των βασικών μεγεθών, όπως η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά **(Εφβ)** η ενέργεια που καταναλώθηκε **(Eload+Ebatt)** και η συνολική απόδοση του συστήματος σε κάθε χρονική περίοδο της ημέρας. Η ανάλυση των μετρήσεων είναι χωρισμένη σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα (πρωί, μεσημέρι, απόγευμα) όπου υπολογίζονται τα δεδομένα που καταγράφηκαν. Τέλος παρουσιάζονται οι μέσοι όροι παραγωγής ενέργειας για κάθε ρυθμιστή καθώς και τα απαραίτητα διαγράμματα Παραγωγής – Χρόνου έτσι ώστε να γίνει πιο κατανοητή η διαφορά ανάμεσα στους δύο ρυθμιστές φόρτισης.

Πειραματική Διάταξη



Δ.Τ : Διαρέτης τάσης λόγος 1/5 για παράδειγμα έχουμε στην είσοδο τάση 15V στην έξοδο θα πάρουμε 3V διότι ο logger δεν μπορεί να δεχτεί παραπάνω από 5V

SHUNT : Αντίσταση shunt σε mΩ που θα μας βοηθήσει να βρούμε το ρεύμα (A)

Χακτηριστικά Πάνελ :

- **Nominal voltage (12 V)** → Η «ονομαστική» τάση χρήσης, για συμβατές μπαταρίες/συστήματα.
- **Pmax (50 W)** → Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το πάνελ σε ιδανικές συνθήκες.
- **Vmp (17.2 V)** → Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος.
- **Imp (2.9 A)** → Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος.
- **Isc (3.2 A)** → Ρεύμα βραχυκυκλώματος (μέγιστο ρεύμα αν οι πόλοι ενωθούν).
- **Voc (45.1 V)** → Τάση ανοικτού κυκλώματος (χωρίς φορτίο).
- **Minimum bypass diode (5 A)** → Ελάχιστη ονομαστική τιμή διόδου παράκαμψης, για προστασία σκιασμένων κυψελών.
- **Series fuse (6 A)** → Προτεινόμενη μέγιστη ασφάλεια σε σειρά, για προστασία κυκλώματος.

Χαρακτηριστικά Μπαταρίας : 12V 7ah

Χαρακτηριστικά Φορτίου : 12V 20W

Αντιστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν :

Σύστημα MPPT
- R1 Πάνελ – 1.5 mΩ
- R2 Μπαταρία - 1 mΩ
- R3 Φορτίο – 2.35 mΩ

Σύστημα PWM
- R4 Πάνελ – 1.6 mΩ
- R5 Μπαταρία – 2.1 mΩ
- R6 Φορτίο – 1.85 mΩ

5.1.2 ΗΜΕΡΑ 3-6-23

1. Πίνακας Αποτελεσμάτων

Περίοδος	Εφβ MPPT	ELoad+EBatt MPPT	Απόδοση MPPT	Εφβ PWM	ELoad+EBatt PWM	Απόδοση PWM
09:00-12:00	89.96	76.88	0.85	81.86	62.94	0.77
12:00-16:00	139.78	120.24	0.86	136.57	108.19	0.79
16:00-19:00	59.95	52.93	0.88	48.48	38.29	0.79
Σύνολο	289.70	250.04	0.86	266.90	209.43	0.78

Πίνακας Wh/h ανα Περίοδο

Περίοδος	MPPT ΕΦΒ Wh/h	MPPT Load+Batt Wh/h	MPPT Απώλειες Wh/h	PWM ΕΦΒ Wh/h	PWM Load+Batt Wh/h	PWM Απώλειες Wh/h
09:00–12:00	29.99	25.63	4.36	27.29	20.98	6.31
12:00–16:00	34.95	30.06	4.89	34.14	27.05	7.09
16:00–19:00	19.98	17.64	2.34	16.16	12.76	3.4

2. Ανάλυση Ανά Περίοδο

• 09:00-12:00: **MPPT** παρήγαγε **89.96 Wh** με απωλειες **13.08Wh** και απόδοση **85.5%**, ενώ ο **PWM 81.86 Wh** με απώλειες **18.92Wh** και απόδοση **76.9%**.

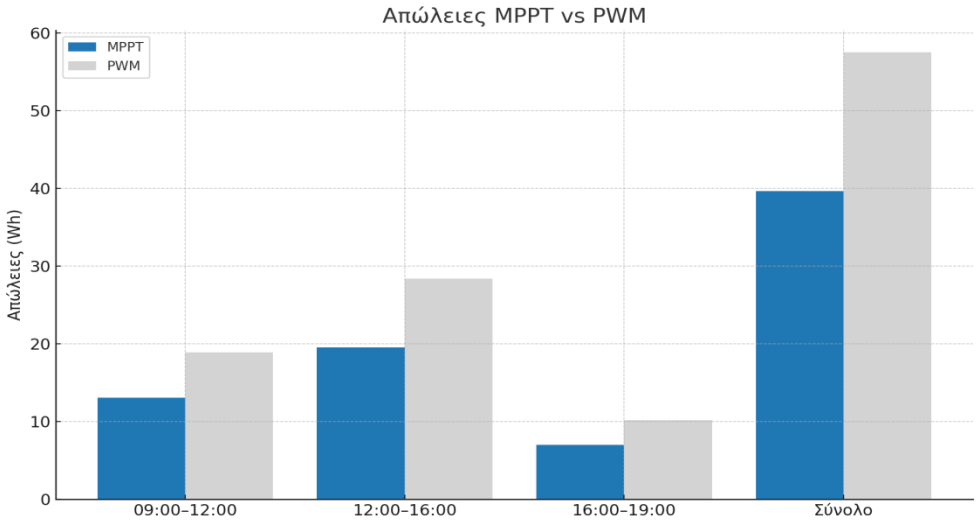
• 12:00-16:00: **MPPT** παρήγαγε **139.78 Wh** με απωλεις **19.54Wh** και απόδοση **86.0%**, ενώ ο **PWM 136.57 Wh** με απώλειες **28.38Wh** και απόδοση **79.2%**.

• 16:00-19:00: **MPPT** παρήγαγε **59.95 Wh** με απώλειες **7.02Wh** και απόδοση **88.3%**, ενώ ο **PWM** **48.48 Wh** με απώλειες **10.19Wh** και απόδοση **79.0%**.

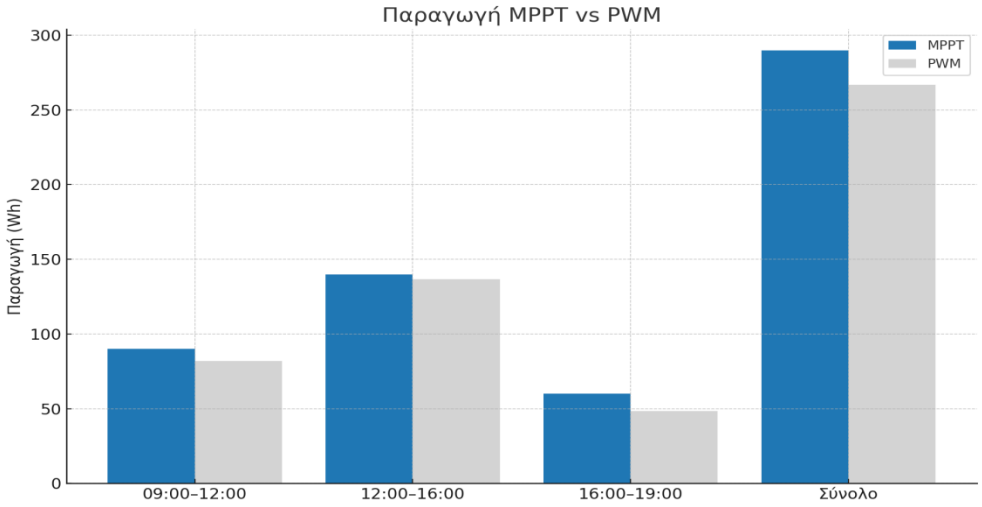
• Σύνολο: **MPPT** παρήγαγε **289.70 Wh** με απώλειες **39.64Wh** και απόδοση **86.3%**, ενώ ο **PWM** **266.90 Wh** με απώλειες **57.49Wh** και απόδοση **78.5%**.

3. Διαγράμματα Απωλειών και Παραγωγής

Απώλειες **MPPT** vs **PWM**:



Παραγωγή **MPPT** vs **PWM**:

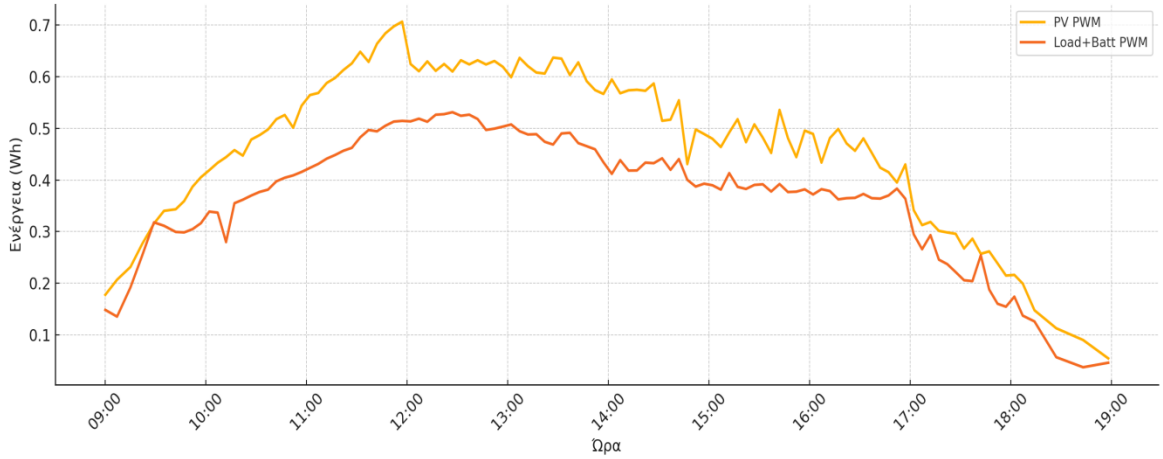


4. Καμπύλες Ενέργειας PV και Load+Batt

Καμπύλη : **MPPT**



Καμπύλη **: PWM**



5.Αναλυτική Πορεία Καμπυλών Ενέργειας - Ανά Περίοδο

Πρωί (09:00–12:00)

Κατά τις πρωινές ώρες, τόσο ο **MPPT** όσο και ο **PWM** ξεκινούν με σταθερή άνοδο στην παραγωγή ενέργειας. Στην περίπτωση του **MPPT**, η καμπύλη της παραγωγής (PV) και της κατανάλωσης/αποθήκευσης (Load+Batt) είναι σχεδόν παράλληλες, δείχνοντας ότι οι απώλειες είναι μικρές και η απόδοση υψηλή. Ο **PWM** από την άλλη παρουσιάζει μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των δύο καμπυλών, κάτι που υποδηλώνει περισσότερες απώλειες ήδη από το πρωί.

Μεσημέρι (12:00–16:00)

Κατά το μεσημέρι, και οι δύο τεχνολογίες φτάνουν σε υψηλή παραγωγή, κοντά στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους. Ο **MPPT** διατηρεί σταθερά υψηλές τιμές και η ενέργεια που αξιοποιείται ακολουθεί πολύ κοντά την παραγόμενη. Στον **PWM** παρατηρείται μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ της καμπύλης παραγωγής και κατανάλωσης, πράγμα που δείχνει ότι δεν αξιοποιεί εξίσου αποτελεσματικά την ηλιακή ενέργεια.

Απόγευμα (16:00–19:00)

Το απόγευμα, ο MPPT συνεχίζει να λειτουργεί αποδοτικά, με σταδιακή και ομαλή πτώση της παραγωγής. Αντιθέτως, στον **PWM** παρατηρείται απότομη πτώση, ιδίως μετά τις 17:00. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι ο **PWM** σταματά να λειτουργεί όταν η τάση του φωτοβολταϊκού πέφτει κάτω από τη στάθμη της μπαταρίας, με αποτέλεσμα να μην αξιοποιεί τη διαθέσιμη ενέργεια στο τέλος της ημέρας.

6. Συμπεράσματα

Συνολικά, ο **MPPT** είχε απόδοση **86.3%** ενώ ο **PWM 78.5%**. Η απόδοση του **MPPT** είναι ανώτερη σε όλες τις χρονικές ζώνες και εξασφαλίζει μικρότερες απώλειες και καλύτερη διαχείριση ενέργειας.

5.1.3 ΗΜΕΡΑ 9-6-23

1. Πίνακας Αποτελεσμάτων

Περίοδος	Εφβ MPPT	ELoad+EBatt MPPT	Απόδοση MPPT	Εφβ PWM	ELoad+EBatt PWM	Απόδοση PWM
09:00-12:00	93.44	81.41	0.87	82.87	62.06	0.75
12:00-16:00	133.26	114.88	0.86	118.74	93.07	0.78
16:00-19:00	56.33	45.35	0.81	46.26	36.51	0.79
Σύνολο	283.04	241.64	0.85	247.87	191.63	0.77

Πίνακας Wh/h ανα Περίοδο

Περίοδος	MPPT ΕΦΒ Wh/h	MPPT Load+Batt Wh/h	MPPT Απώλειες Wh/h	PWM ΕΦΒ Wh/h	PWM Load+Batt Wh/h	PWM Απώλειες Wh/h
09:00–12:00	31.15	27.14	4.01	27.62	20.69	6.93
12:00–16:00	33.31	28.72	4.59	29.68	23.27	6.41
16:00–19:00	18.78	15.12	3.66	15.42	12.17	3.25

2. Ανάλυση Ανά Περίοδο

• 09:00–12:00: **MPPT** παρήγαγε **93.44 Wh** με απώλειες **12.03 Wh** και απόδοση **87.1%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **82.87 Wh** με απώλειες **20.79 Wh** και απόδοση **74.9%**.

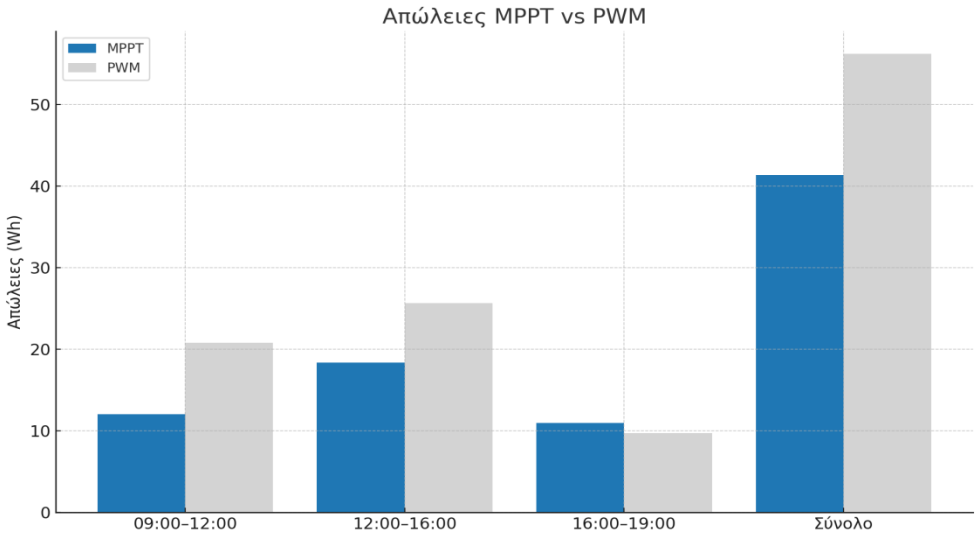
• 12:00–16:00: **MPPT** παρήγαγε **133.26 Wh** με απώλειες **18.38 Wh** και απόδοση **86.2%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **118.74 Wh** με απώλειες **25.67 Wh** και απόδοση **78.4%**.

• 16:00–19:00: **MPPT** παρήγαγε **56.33 Wh** με απώλειες **10.99 Wh** και απόδοση **80.5%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **46.26 Wh** με απώλειες **9.75 Wh** και απόδοση **78.9%**.

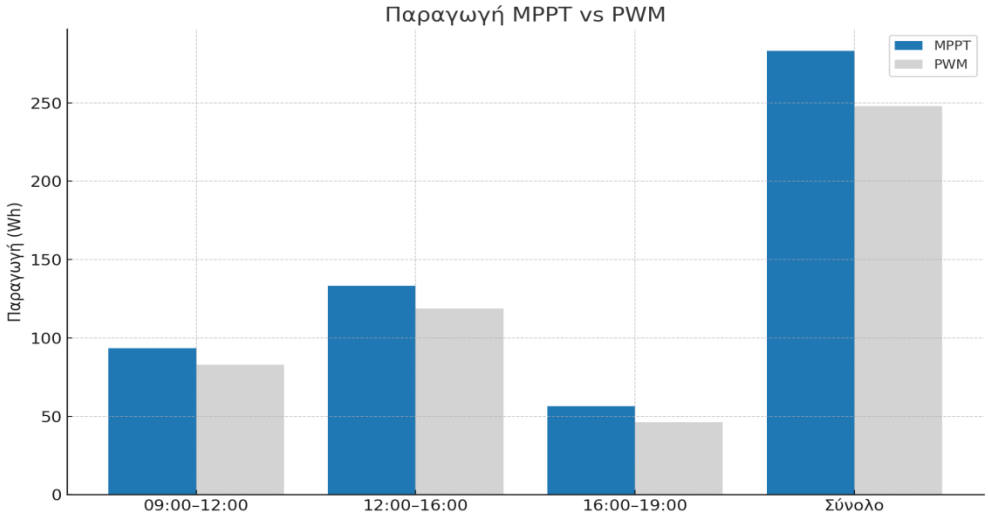
• Σύνολο: **MPPT** παρήγαγε συνολικά **283.04 Wh** με απώλειες **41.40 Wh** και μέση απόδοση **85.4%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε συνολικά **247.87 Wh** με απώλειες **56.24 Wh** και μέση απόδοση **77.3%**.

3. Διαγράμματα Απωλειών και Παραγωγής

Απώλειες **MPPT** vs **PWM**:

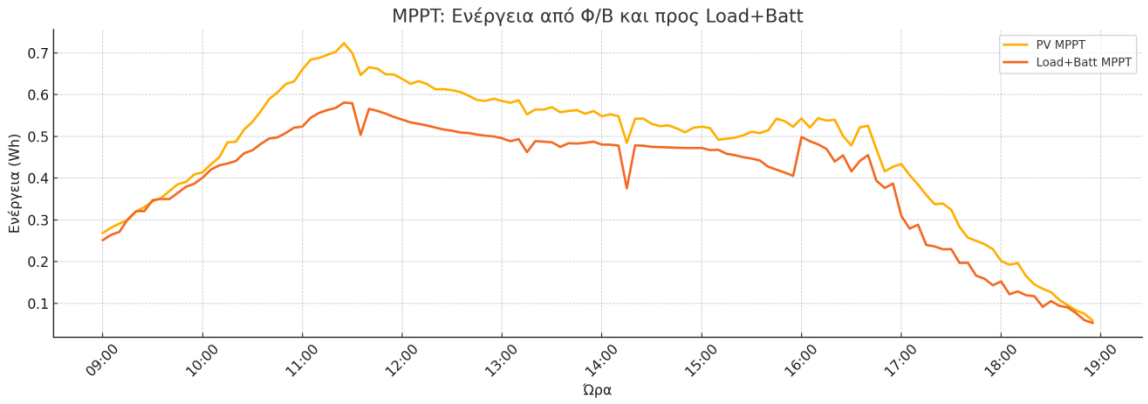


Παραγωγή **MPPT** vs **PWM:**

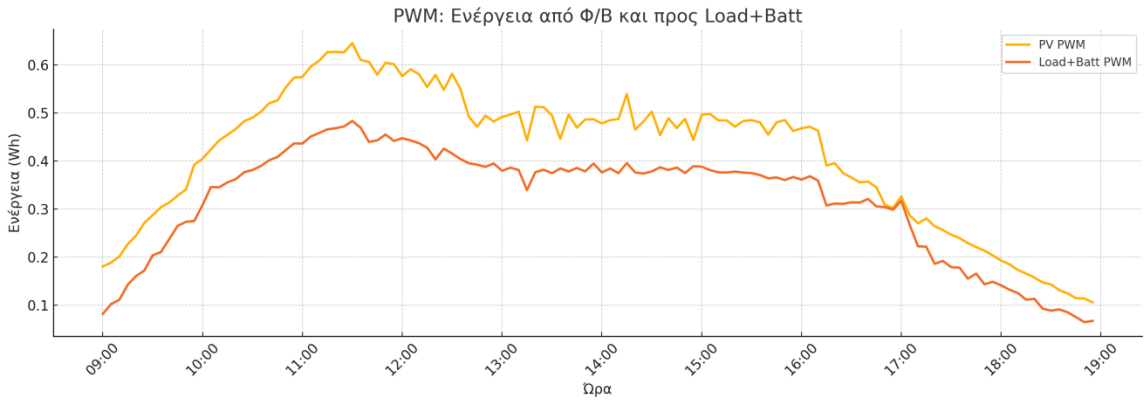


4.ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΡΟΣ ΧΡΟΝΟ

Καμπυλη: **MPPT**



Καμπύλη**:PWM**



5.Αναλυτική Πορεία Καμπυλών Ενέργειας - Ανά Περίοδο

Πρωί (09:00–12:00)

Και οι δύο τεχνολογίες ξεκινούν με σταθερή άνοδο στην παραγωγή. Ο MPPT δείχνει πιο ομαλή και κοντινή σχέση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, ενώ ο PWM έχει μεγαλύτερη απόσταση ανάμεσα στις καμπύλες του, που σημαίνει περισσότερες απώλειες.

Μεσημέρι (12:00–16:00)

Ο MPPT κρατάει σταθερά υψηλή παραγωγή και κατανάλωση με μικρές διαφορές. Ο PWM ανεβαίνει καλά αλλά εμφανίζει διακυμάνσεις και μικρότερη αξιοποίηση της ενέργειας, πιθανώς λόγω των περιορισμών του σε υψηλή τάση.

Απόγευμα (16:00–19:00)

Ο MPPT συνεχίζει να δουλεύει αποδοτικά καθώς πέφτει ο ήλιος. Ο PWM όμως χάνει σταδιακά την ικανότητα να δίνει ενέργεια στο σύστημα και κάποια στιγμή σταματά σχεδόν εντελώς.

6. Συμπεράσματα

Συνολικά, ο **MPPT** παρουσίασε απόδοση **85.4%** έναντι **77.3%** του **PWM**. ο **MPPT** παρουσιάζει μικρότερες απώλειες και υψηλότερη αξιοποίηση της ενέργειας σε όλες τις χρονικές περιόδους.

5.1.4 ΗΜΕΡΑ 27-6-23

1. Πίνακας Αποτελεσμάτων

Περίοδος	Εφβ MPPT	ELoad+EBatt MPPT	Απόδοση MPPT	Εφβ PWM	ELoad+EBatt PWM	Απόδοση PWM
09:00-12:00	92.49	81.57	0.88	79.69	61.20	0.77
12:00-16:00	140.75	121.84	0.87	123.28	95.83	0.78
16:00-19:00	56.78	50.00	0.88	43.47	32.91	0.76
Σύνολο	290.03	253.41	0.87	246.43	189.94	0.77

Πίνακας Wh/h ανα Περίοδο

Περίοδος	MPPT ΕΦΒ Wh/h	MPPT Load+Batt Wh/h	MPPT Απώλειες Wh/h	PWM ΕΦΒ Wh/h	PWM Load+Batt Wh/h	PWM Απώλειες Wh/h
09:00–12:00	30.83	27.19	3.64	26.56	20.4	6.16
12:00–16:00	35.19	30.46	4.73	30.82	23.96	6.86
16:00–19:00	18.93	16.67	2.26	14.49	10.97	3.52

2. Ανάλυση Ανά Περίοδο

• 09:00–12:00: **MPPT** παρήγαγε **92.49 Wh** με απώλειες **10.92 Wh** και απόδοση **88.2%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **79.69 Wh** με απώλειες **18.48 Wh** και απόδοση **76.8%**.

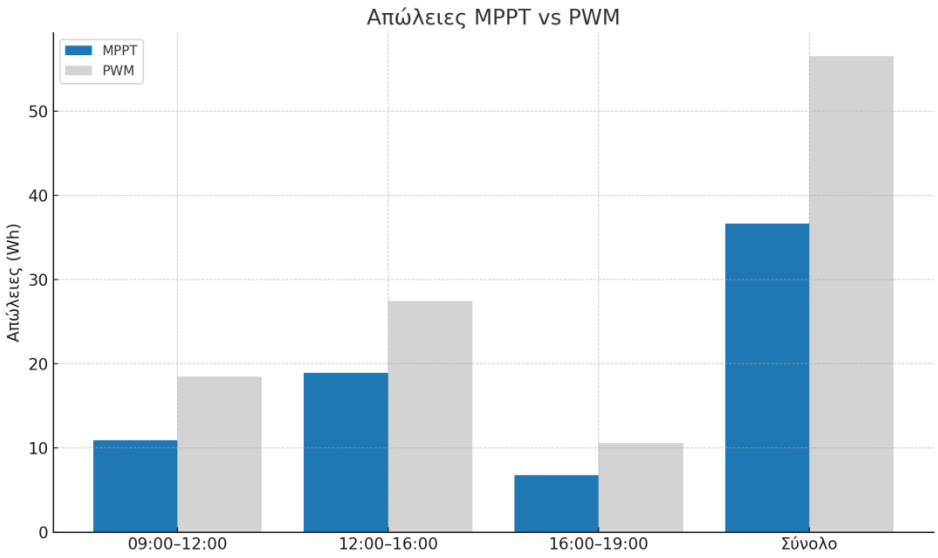
• 12:00–16:00: **MPPT** παρήγαγε **140.75 Wh** με απώλειες **18.92 Wh** και απόδοση **86.6%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **123.28 Wh** με απώλειες **27.44 Wh** και απόδοση **77.7%**.

• 16:00–19:00: **MPPT** παρήγαγε **56.78 Wh** με απώλειες **6.78 Wh** και απόδοση **88.1%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **43.47 Wh** με απώλειες **10.56 Wh** και απόδοση **75.7%**.

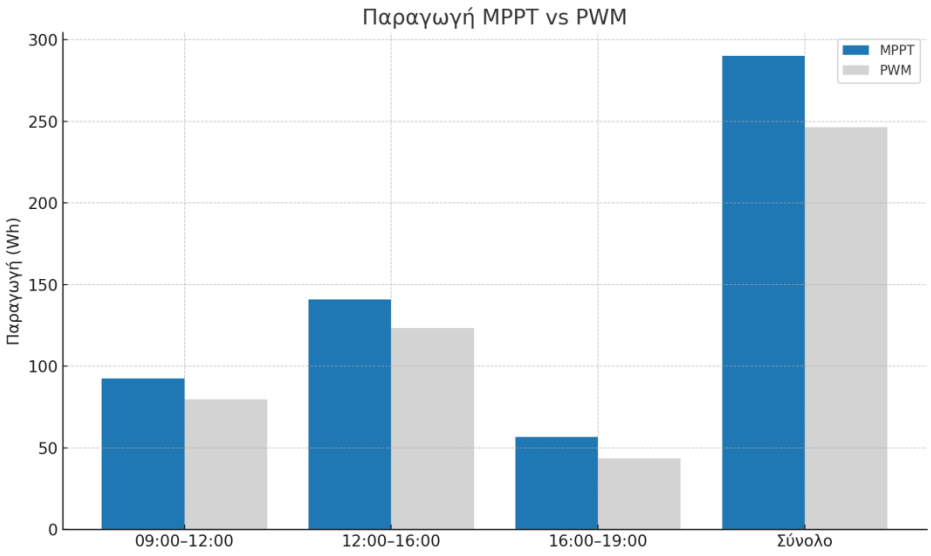
• Σύνολο: **MPPT** παρήγαγε συνολικά **290.03 Wh** με απώλειες **36.62 Wh** και μέση απόδοση **87.4%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε συνολικά **246.43 Wh** με απώλειες **56.49 Wh** και μέση απόδοση **77.1%**.

3. Γραφήματα Απωλειών και Παραγωγής

Απώλειες **MPPT** vs **PWM**:

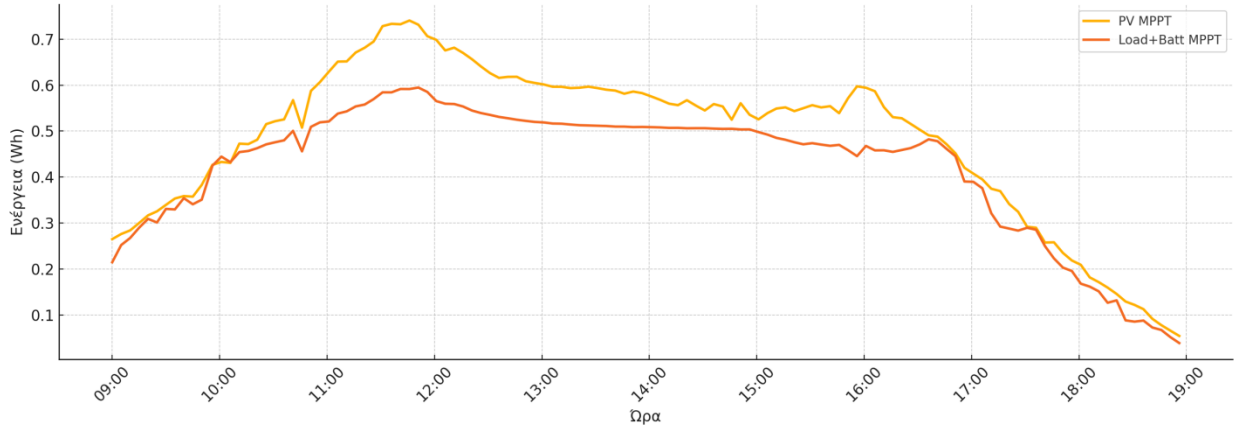


Παραγωγή **MPPT** vs **PWM:**

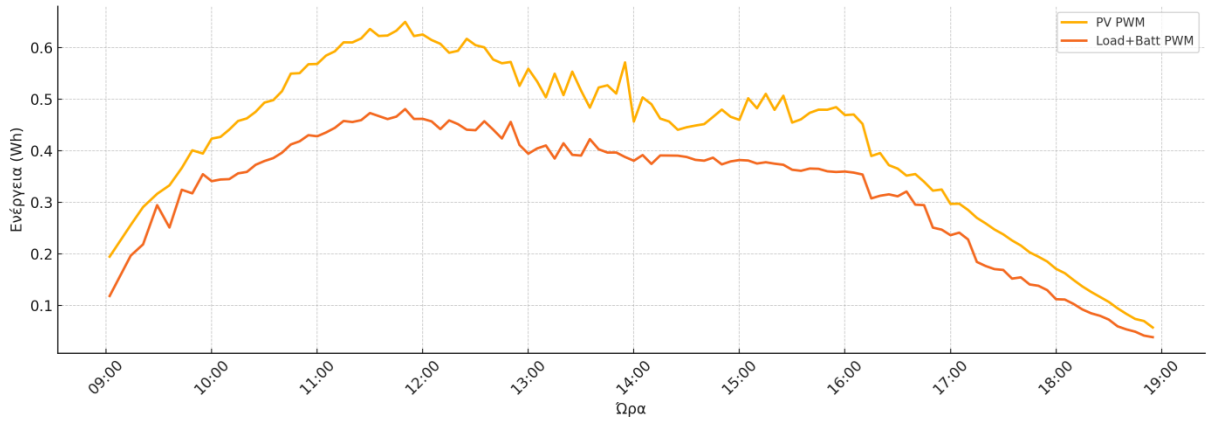


4. Καμπύλες Ενέργειας PV και Load+Batt

Καμπύλη **MPPT**:



Καμπύλη **PWM**:



5.Αναλυτική Πορεία Καμπυλών Ενέργειας - Ανά Περίοδο

Πρωί (09:00–12:00)

Ο **MPPT** ανεβαίνει σταθερά με μικρή απόσταση μεταξύ των γραμμών, δείχνοντας καλή αξιοποίηση της παραγωγής. Ο **PWM** επίσης ανεβαίνει αλλά η απόσταση από την έξοδο είναι μεγαλύτερη, άρα έχει περισσότερες απώλειες.

Μεσημέρι (12:00–16:00)

Ο **MPPT** κρατάει υψηλή και σταθερή παραγωγή και σχεδόν όλη η ενέργεια φτάνει στο σύστημα. Ο **PWM** παρουσιάζει πολλές αυξομειώσεις και η έξοδος μένει πιο χαμηλά από την παραγωγή του.

Απόγευμα (16:00–19:00)

Ο **MPPT** συνεχίζει να λειτουργεί ομαλά με μειωμένη παραγωγή αλλά καλή απόδοση. Ο **PWM** αρχίζει να πέφτει γρήγορα και μετά τις 17:00 περίπου σταματά σχεδόν να στέλνει ενέργεια στο φορτίο.

6. Συμπεράσματα

Συνολικά, ο **MPPT** παρουσίασε απόδοση **87.4%** έναντι **77.1%** του **PWM**. ο **MPPT** παρουσιάζει μικρότερες απώλειες και υψηλότερη αξιοποίηση της ενέργειας σε όλες τις χρονικές περιόδους.

5.1.5 ΗΜΕΡΑ 6-7-23

1. Πίνακας Αποτελεσμάτων

Περίοδος	Εφβ MPPT	ELoad+EBatt MPPT	Απόδοση MPPT	Εφβ PWM	ELoad+EBatt PWM	Απόδοση PWM
09:00-12:00	94.64	82.01	0.87	80.32	61.86	0.77
12:00-16:00	140.27	123.28	0.88	119.98	94.12	0.78
16:00-19:00	60.61	54.63	0.90	44.91	35.79	0.80
Σύνολο	295.51	259.93	0.88	245.22	191.77	0.78

Πίνακας Wh/h ανα Περίοδο

Περίοδος	MPPT ΕΦΒ Wh/h	MPPT Load+Batt Wh/h	MPPT Απώλειες Wh/h	PWM ΕΦΒ Wh/h	PWM Load+Batt Wh/h	PWM Απώλειες Wh/h
09:00–12:00	31.55	27.34	4.21	26.77	20.62	6.15
12:00–16:00	35.07	30.82	4.25	30.0	23.53	6.47
16:00–19:00	20.2	18.21	1.99	14.97	11.93	3.04

2. Ανάλυση Ανά Περίοδο

• 09:00–12:00: **MPPT** παρήγαγε **94.64 Wh** με απώλειες **12.63 Wh** και απόδοση **86.7%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **80.32 Wh** με απώλειες **18.45 Wh** και απόδοση **77.0%**.

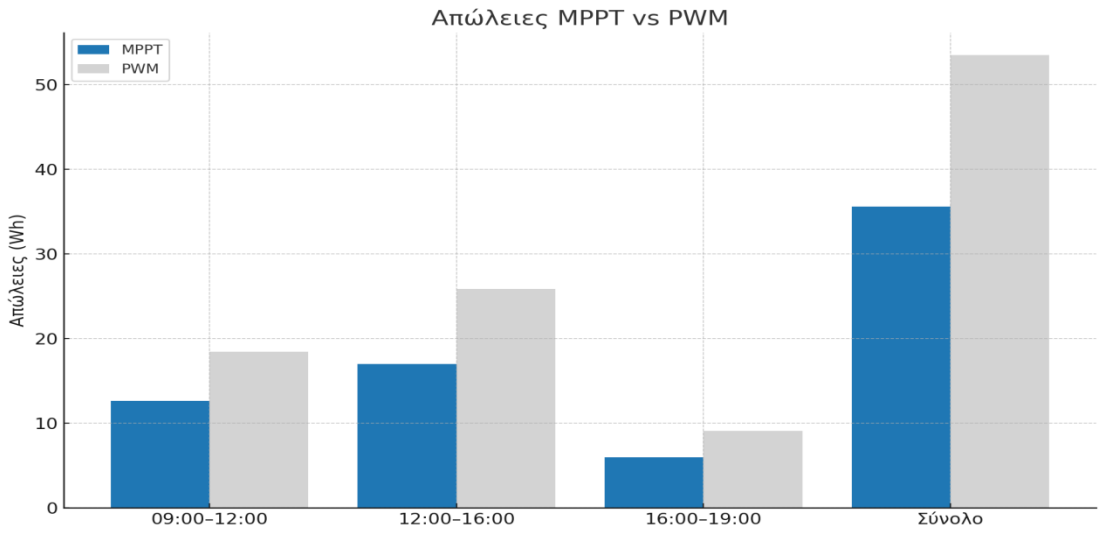
• 12:00–16:00: **MPPT** παρήγαγε **140.27 Wh** με απώλειες **17.00 Wh** και απόδοση **87.9%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **119.98 Wh** με απώλειες **25.88 Wh** και απόδοση **78.4%**.

• 16:00–19:00: **MPPT** παρήγαγε **60.61 Wh** με απώλειες **5.97 Wh** και απόδοση **90.1%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **44.91 Wh** με απώλειες **9.12 Wh** και απόδοση **79.7%**.

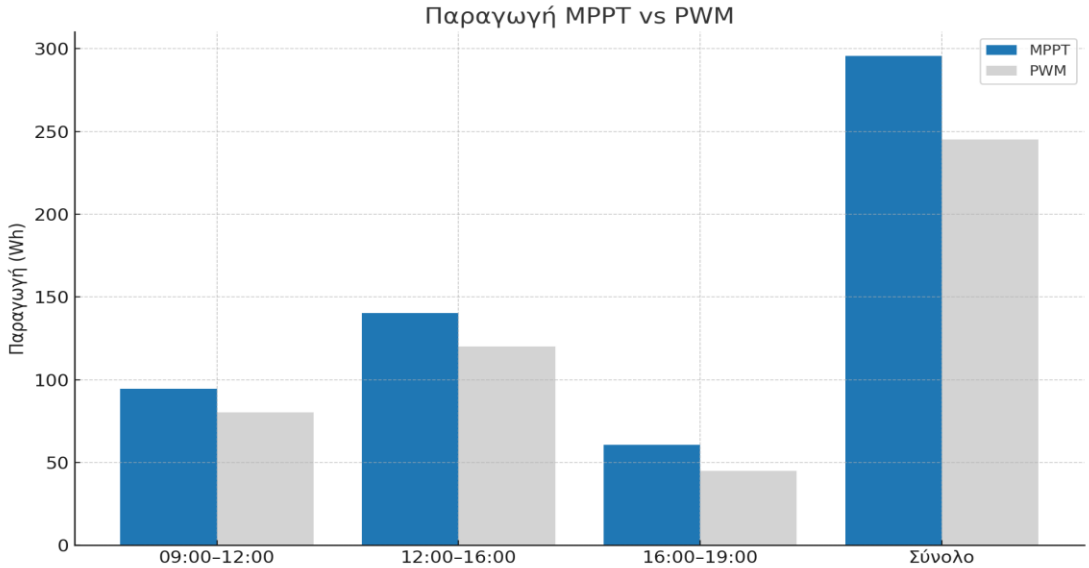
• Σύνολο: **MPPT** παρήγαγε συνολικά **295.51 Wh** με απώλειες **35.58 Wh** και μέση απόδοση **88.0%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε συνολικά **245.22 Wh** με απώλειες **53.45 Wh** και μέση απόδοση **78.2%**.

4. Γραφήματα Απωλειών και Παραγωγής

Απώλειες **MPPT** vs **PWM**:

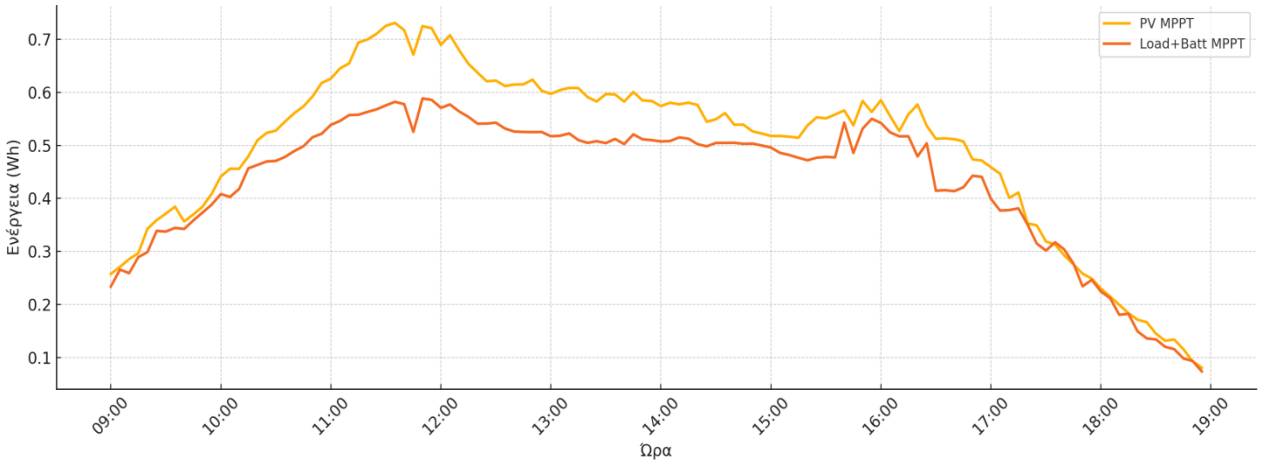


Παραγωγή **MPPT** vs **PWM:**

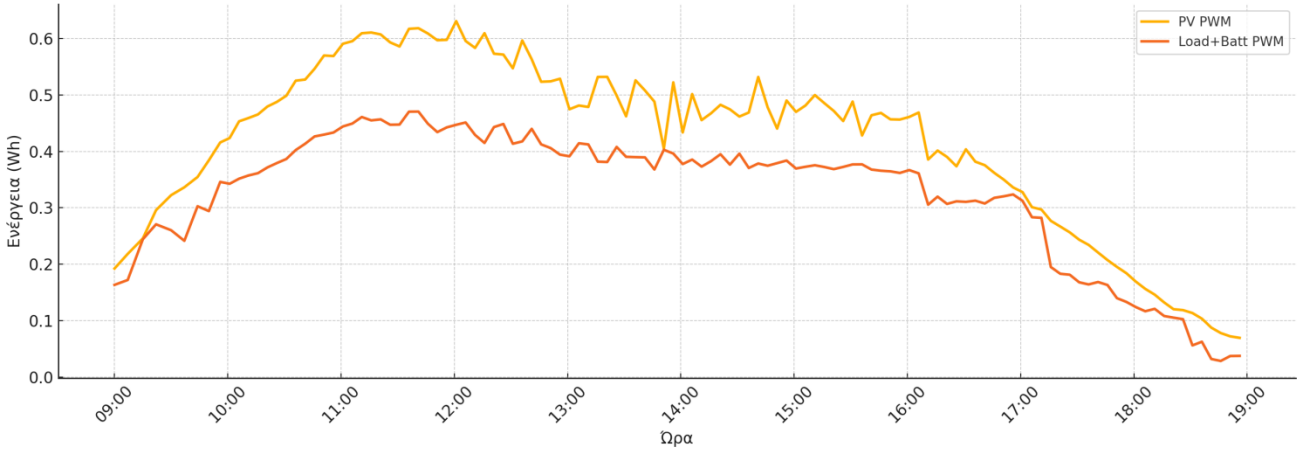


5. Καμπύλες Ενέργειας PV και Load+Batt

Καμπύλη **MPPT**:



Καμπύλη **PWM**:



5.Αναλυτική Πορεία Καμπυλών Ενέργειας - Ανά Περίοδο

Πρωί (09:00–12:00)

Ο **MPPT** αυξάνει την παραγωγή του σταθερά και η ενέργεια που μεταφέρεται στο σύστημα παραμένει κοντά στην παραγόμενη. Ο **PWM** παρουσιάζει επίσης άνοδο, αλλά με μεγαλύτερες απώλειες καθώς η καμπύλη εξόδου είναι πιο χαμηλά.

Μεσημέρι (12:00–16:00)

Ο **MPPT** κρατάει υψηλή και σταθερή απόδοση για πολλές ώρες. Η διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης είναι μικρή. Αντίθετα, ο **PWM** παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις και η γραμμή εξόδου δεν πλησιάζει όσο του **MPPT** την παραγωγή.

Απόγευμα (16:00–19:00)

Ο **MPPT** εξακολουθεί να λειτουργεί αποτελεσματικά όσο μειώνεται η ηλιακή ακτινοβολία, με σταδιακή πτώση. Ο **PWM** χάνει γρήγορα την ικανότητα αξιοποίησης της ενέργειας και περιορίζεται αισθητά μετά τις 17:00.

6. Συμπεράσματα

Συνολικά, ο **MPPT** παρουσίασε απόδοση **88.0%** ενώ ο **PWM 78.2%**. Η καμπύλη του MPPT είναι πιο σταθερή και αποδοτική καθ’ όλη τη διάρκεια της ημέρας με μικρότερες απώλειες.

5.1.6 ΗΜΕΡΑ 13-7-23

1. Πίνακας Αποτελεσμάτων

Περίοδος	Εφβ MPPT	ELoad+EBatt MPPT	Απόδοση MPPT	Εφβ PWM	ELoad+EBatt PWM	Απόδοση PWM
09:00-12:00	93.38	78.61	0.84	83.76	64.80	0.77
12:00-16:00	136.53	119.46	0.87	120.06	95.66	0.80
16:00-19:00	57.11	49.47	0.87	44.58	36.40	0.82
Σύνολο	287.02	247.54	0.86	248.39	196.87	0.79

Πίνακας Wh/h ανα Περίοδο

Περίοδος	MPPT ΕΦΒ Wh/h	MPPT Load+Batt Wh/h	MPPT Απώλειες Wh/h	PWM ΕΦΒ Wh/h	PWM Load+Batt Wh/h	PWM Απώλειες Wh/h
09:00–12:00	31.13	26.2	4.93	27.92	21.6	6.32
12:00–16:00	34.13	29.86	4.27	30.02	23.91	6.11
16:00–19:00	19.04	16.49	2.55	14.86	12.13	2.73

2. Ανάλυση Ανά Περίοδο

• 09:00–12:00: **MPPT** παρήγαγε **93.38 Wh** με απώλειες **14.79 Wh** και απόδοση **84.2%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **83.76 Wh** με απώλειες **18.96 Wh** και απόδοση **77.4%**.

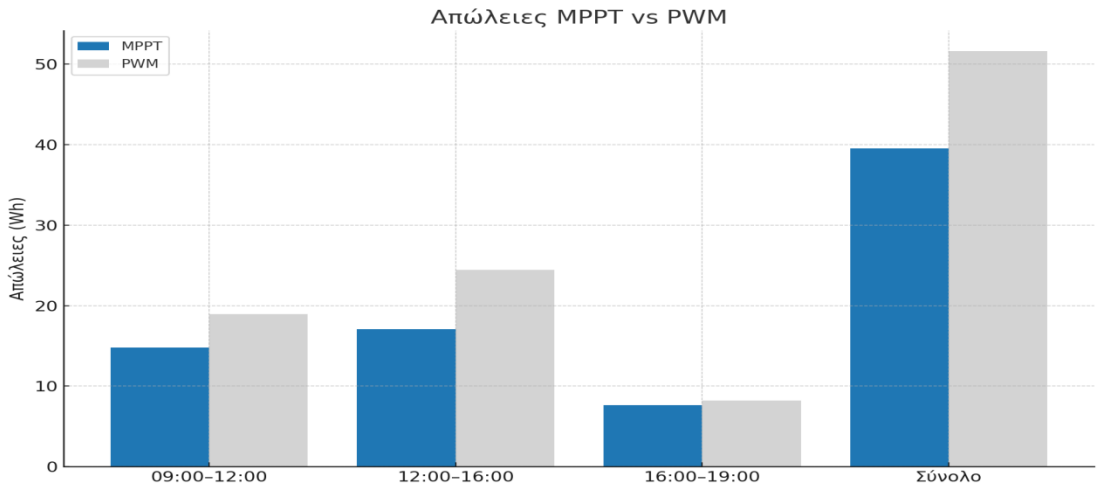
• 12:00–16:00: **MPPT** παρήγαγε **136.53 Wh** με απώλειες **17.08 Wh** και απόδοση **87.5%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **120.06 Wh** με απώλειες **24.44 Wh** και απόδοση **79.7%**.

• 16:00–19:00: **MPPT** παρήγαγε **57.11 Wh** με απώλειες **7.65 Wh** και απόδοση **86.6%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **44.58 Wh** με απώλειες **8.19 Wh** και απόδοση **81.7%**.

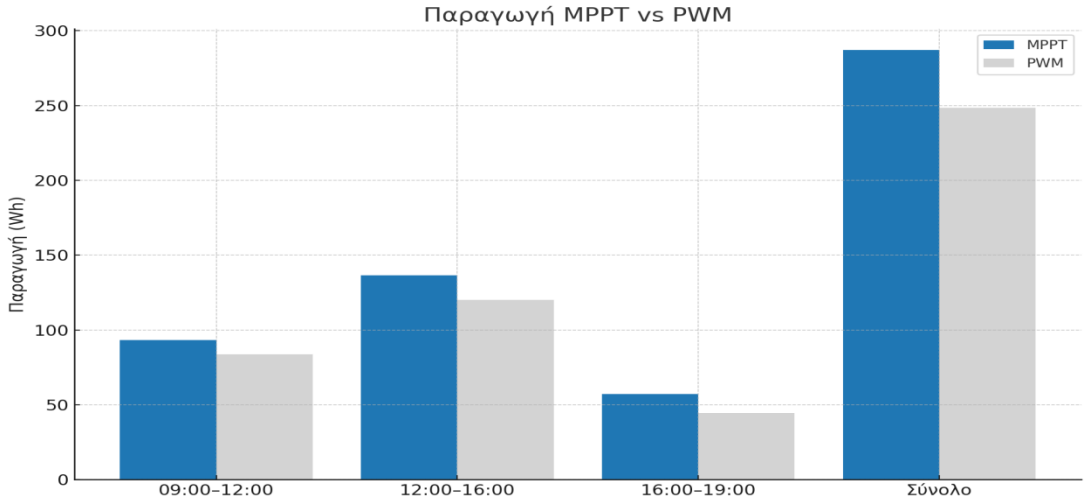
• Σύνολο: **MPPT** παρήγαγε συνολικά **287.02 Wh** με απώλειες **39.48 Wh** και μέση απόδοση **86.2%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε συνολικά **248.39 Wh** με απώλειες **51.52 Wh** και μέση απόδοση **79.3%**.

3. Διαγράμματα

Απώλειες **MPPT** vs **PWM**:

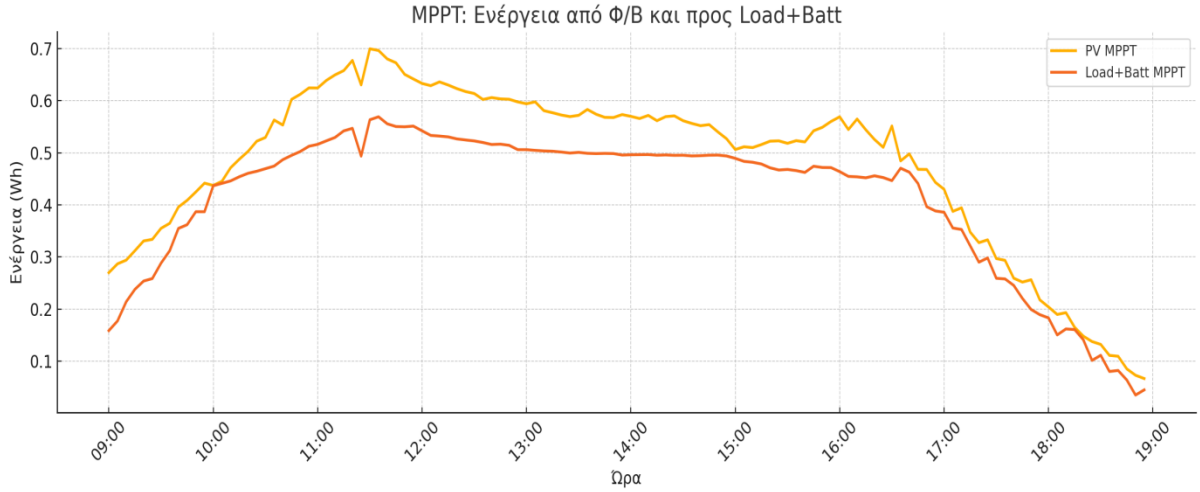


Παραγωγη **MPPT** vs **PWM**:

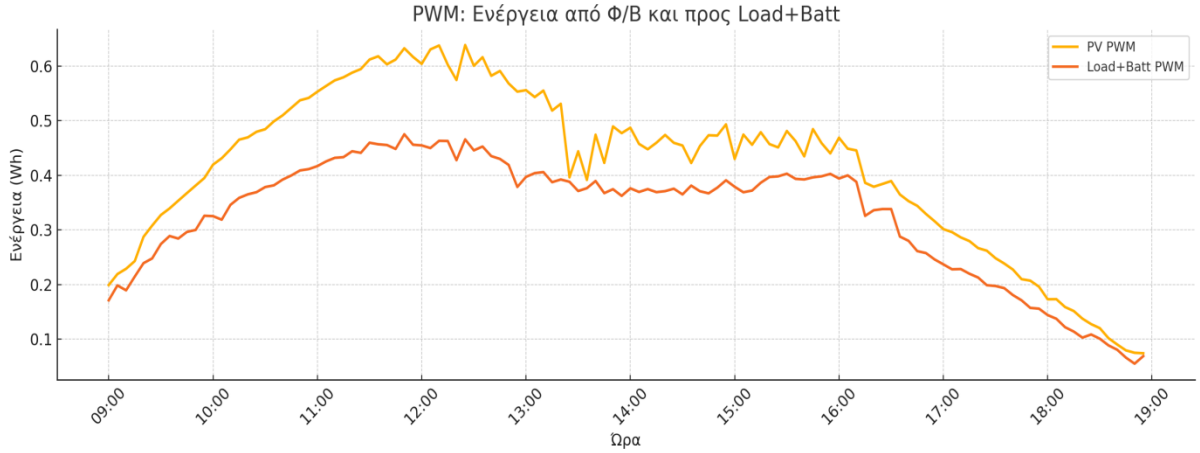


4. Καμπύλες Ενέργειας

Καμπύλη **MPPT**:



Καμπύλη **PWM**:



5.Αναλυτική Πορεία Καμπυλών Ενέργειας - Ανά Περίοδο

Πρωί (09:00–12:00)

Και οι δύο τεχνολογίες παρουσιάζουν σταθερή άνοδο. Ο **MPPT** έχει μικρή διαφορά μεταξύ παραγωγής και εξόδου, πράγμα που σημαίνει καλή απόδοση. Ο **PWM** δείχνει μεγαλύτερη απόσταση στις καμπύλες, άρα περισσότερες απώλειες.

Μεσημέρι (12:00–16:00)

Η γραμμή του **MPPT** διατηρείται ψηλά και σταθερά, με την έξοδο κοντά στην παραγωγή. Ο **PWM** παρουσιάζει πτώσεις και διακυμάνσεις, με μεγαλύτερες απώλειες και λιγότερη σταθερότητα.

Απόγευμα (16:00–19:00)

Ο **MPPT** συνεχίζει να αποδίδει σταθερά με ομαλή μείωση. Ο **PWM** όμως περιορίζεται έντονα μετά τις 17:00 και η απόδοση πέφτει αισθητά.

6. Συμπεράσματα

Ο **MPPT** αποδίδει σταθερά υψηλότερα σε όλες τις περιόδους με λιγότερες απώλειες. Ο **PWM** υπολείπεται ιδίως τις ώρες υψηλής ακτινοβολίας. Οι διαφορές μειώνονται το απόγευμα. Συνολικά, ο **MPPT** έχει απόδοση 86.2%, ενώ ο **PWM** 79.3%.

5.1.7 ΗΜΕΡΑ 22-7-23

1. Πίνακας Αποτελεσμάτων

Περίοδος	Εφβ MPPT	ELoad+EBatt MPPT	Απόδοση MPPT	Εφβ PWM	ELoad+EBatt PWM	Απόδοση PWM
09:00-12:00	89.12	79.46	0.89	75.38	58.55	0.78
12:00-16:00	147.57	128.24	0.87	97.29	77.10	0.79
16:00-19:00	52.93	47.55	0.90	35.76	27.64	0.77
Σύνολο	289.63	255.25	0.88	208.43	163.29	0.78

Πίνακας Wh/h ανα Περίοδο

Περίοδος	MPPT ΕΦΒ Wh/h	MPPT Load+Batt Wh/h	MPPT Απώλειες Wh/h	PWM ΕΦΒ Wh/h	PWM Load+Batt Wh/h	PWM Απώλειες Wh/h
09:00–12:00	29.71	26.49	3.22	25.13	19.52	5.61
12:00–16:00	36.89	32.06	4.83	24.32	19.27	5.05
16:00–19:00	17.64	15.85	1.79	11.92	9.21	2.71

2. Ανάλυση Ανά Περίοδο

• 09:00–12:00: **MPPT** παρήγαγε **89.12 Wh** με απώλειες **9.66 Wh** και απόδοση **89.2%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **75.38 Wh** με απώλειες **16.83 Wh** και απόδοση **77.7%**.

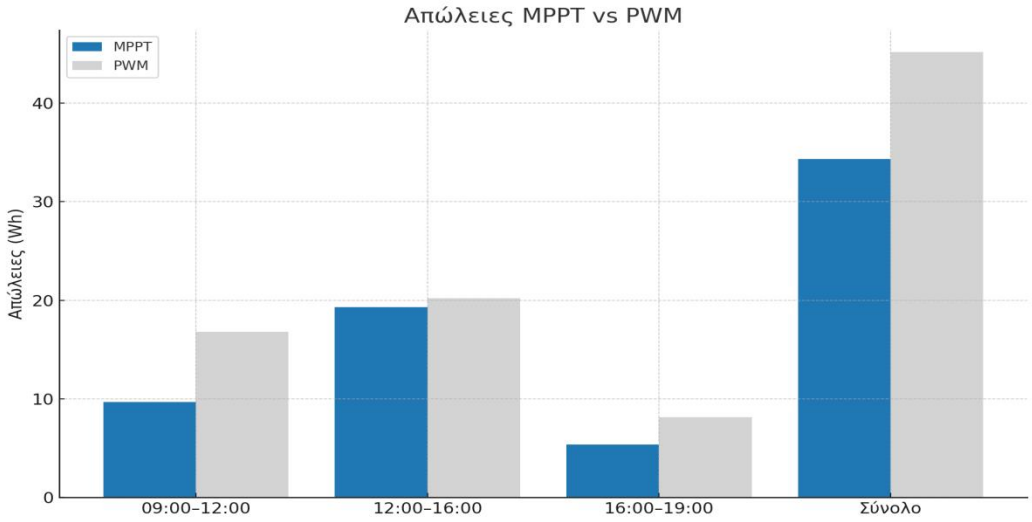
• 12:00–16:00: **MPPT** παρήγαγε **147.57 Wh** με απώλειες **19.32 Wh** και απόδοση **86.9%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **97.29 Wh** με απώλειες **20.20 Wh** και απόδοση **79.2%**.

• 16:00–19:00: **MPPT** παρήγαγε **52.93 Wh** με απώλειες **5.37 Wh** και απόδοση **89.8%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε **35.76 Wh** με απώλειες **8.13 Wh** και απόδοση **77.3%**.

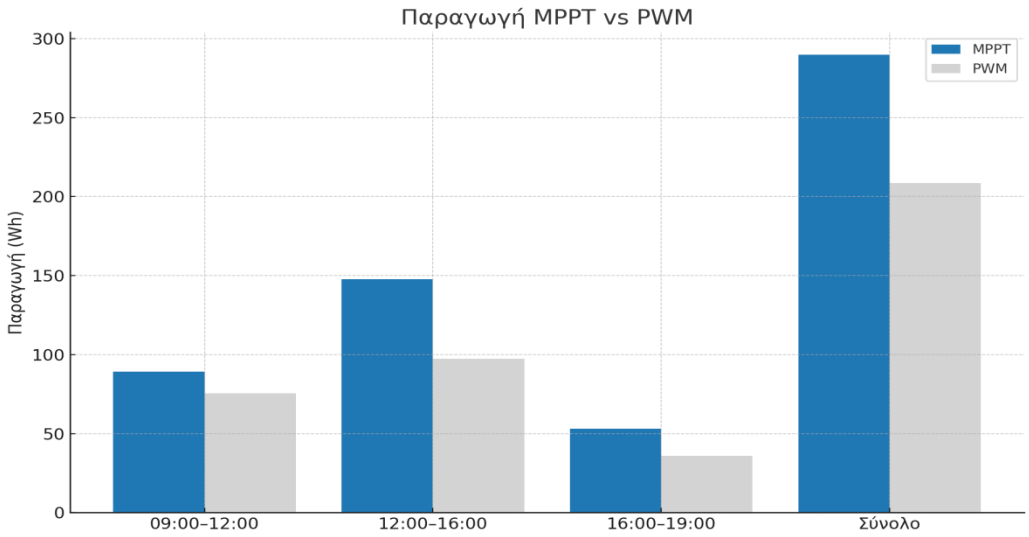
• Σύνολο: **MPPT** παρήγαγε συνολικά **289.63 Wh** με απώλειες **34.38 Wh** και μέση απόδοση **88.1%**, ενώ ο **PWM** παρήγαγε συνολικά **208.43 Wh** με απώλειες **45.14 Wh** και μέση απόδοση **78.3%**.

4. Διαγράμματα Απωλειών και Παραγωγής

Απώλειες **MPPT** vs **PWM**:

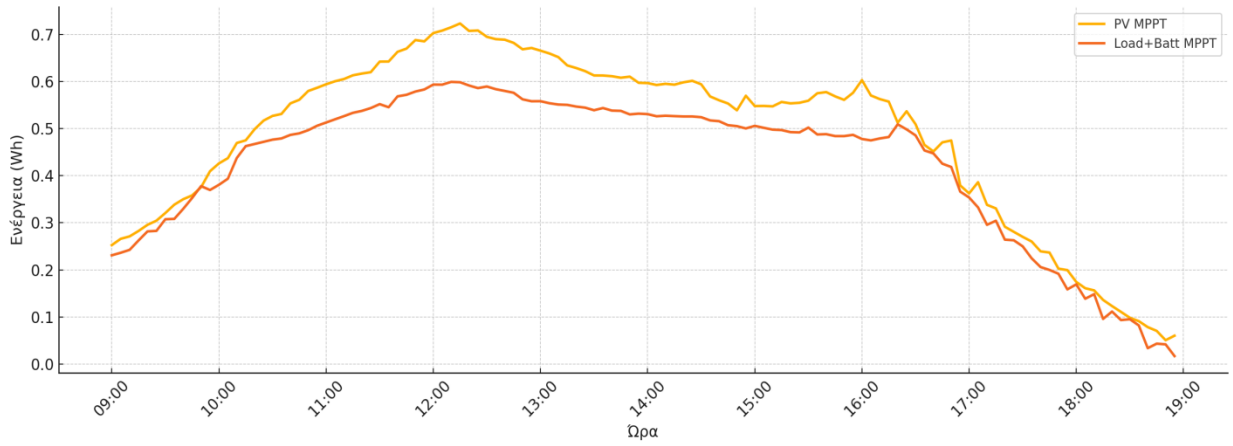


Παραγωγη **MPPT** vs **PWM**:

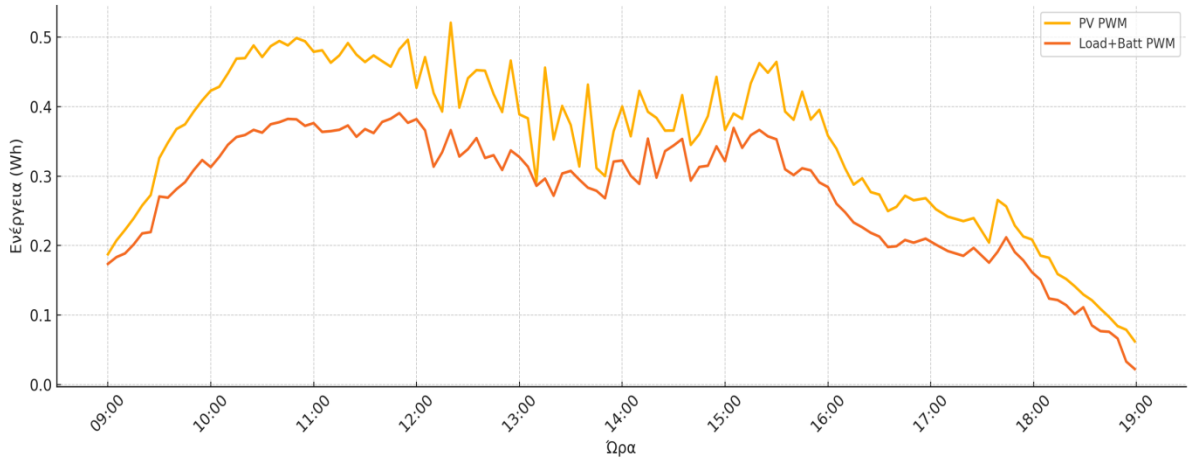


5. Καμπύλες Ενέργειας PV και Load+Batt

Καμπύλη **MPPT**:



Καμπύλη **PWM**:



5.Αναλυτική Πορεία Καμπυλών Ενέργειας - Ανά Περίοδο

Πρωί (09:00–12:00)

Ο **MPPT** ξεκινά με σταθερή άνοδο και μικρές απώλειες. Οι καμπύλες του είναι ομαλές και δείχνουν ότι αξιοποιεί την ενέργεια σωστά. Ο PWM επίσης ανεβαίνει αλλά αρχίζουν να φαίνονται μικρές διακυμάνσεις στην παραγωγή. Η γραμμή του PV έχει αρχίσει να γίνεται 'δονητική', δηλαδή ανεβοκατεβαίνει έντονα.

Μεσημέρι (12:00–16:00)

Η λειτουργία του **MPPT** παραμένει σταθερή και συνεχίζει να λειτουργεί με πολύ καλή απόδοση και μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο γραμμών. Στον **PWM** όμως η καμπύλη παραγωγής γίνεται έντονα 'οδοντωτή', με συνεχείς αυξομειώσεις. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δυσκολεύεται να σταθεροποιήσει την ενέργεια που τραβά από το φωτοβολταϊκό. Η έξοδος (Load+Batt) παραμένει πιο σταθερή, αλλά χαμηλότερα από την παραγωγή, δείχνοντας αυξημένες απώλειες.

Απόγευμα (16:00–19:00)

Ο **MPPT** εξακολουθεί να λειτουργεί με συνέπεια, με καλή απόδοση ακόμη και σε χαμηλότερη ηλιοφάνεια. Αντίθετα, στον **PWM** οι καμπύλες αρχίζουν να πέφτουν πιο απότομα, με την παραγωγή να διακόπτεται σχεδόν εντελώς μετά τις 17:00. Οι διακυμάνσεις υποχωρούν, αλλά η απόδοση είναι πλέον αρκετά περιορισμένη.

6. Συμπεράσματα

Συνολικά, ο **MPPT** παρουσίασε απόδοση 88.1% ενώ ο PWM 78.3%. ο **MPPT** εκμεταλλεύεται καλύτερα την ηλιακή ενέργεια σε όλες τις χρονικές ζώνες της ημέρας.

5.2 ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ & ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Στους παρακάτω πίνακες είναι τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο, περιέχουν την μέση ενέργεια **ΕΦΒ** που παράγετε από τα πλαίσια για κάθε ημέρα αλλά και την κατανάλωση από μπαταρία και φορτίο **Eload + Ebatt** για κάθε σύστημα ξεχωριστά και την απόδοση τους.

Επίσης παρουσιάζονται και τα διαγράμματα Ενέργεια – χρόνου για MPPT και PWM και η σύγκριση αυτών.

5.2.1 Πίνακας ημερήσιων αποτελεσμάτων για τον μήνα ΙΟΥΝΙΟΣ

Ημερομηνία	Εφβ MPPT	Eload+Ebatt MPPT	Απόδοση MPPT	Εφβ PWM	Eload+Ebatt PWM	Απόδοση PWM
3-6	289.70	250.04	0.86	266.90	209.43	0.78
4-6	275.90	239.67	0.87	246.04	200.83	0.82
5-6	250.35	217.47	0.87	225.29	184.77	0.82
6-6	272.31	238.60	0.88	239.24	195.90	0.82
7-6	238.23	218.48	0.92	208.20	168.10	0.81
8-6	166.49	157.32	0.94	131.94	108.32	0.82
9-6	283.04	241.64	0.85	247.87	191.63	0.77
10-6	266.07	233.05	0.88	246.53	195.54	0.79
11-6	246.83	225.17	0.91	220.73	178.42	0.81
12-6	274.66	225.24	0.82	233.08	187.82	0.81
13-6	259.97	228.96	0.88	241.94	193.03	0.80
14-6	259.52	229.02	0.88	243.16	194.22	0.80
15-6	256.88	230.09	0.90	239.55	191.24	0.80
16-6	171.19	154.29	0.90	143.90	116.93	0.81
17-6	270.22	256.61	0.95	231.20	189.84	0.82
18-6	241.05	231.56	0.96	190.04	154.01	0.81
19-6	255.62	236.75	0.93	214.46	169.74	0.79

20-6	252.28	232.47	0.92	219.10	173.51	0.79
21-6	277.29	242.62	0.87	229.97	183.03	0.80
22-6	148.20	140.01	0.94	134.31	103.41	0.77
23-6	268.73	242.45	0.90	225.48	179.61	0.80
24-6	272.06	246.12	0.90	233.88	185.61	0.79
25-6	269.74	241.63	0.90	229.84	182.21	0.79
26-6	265.22	240.42	0.91	227.63	181.20	0.80
27-6	290.03	253.41	0.87	246.43	189.94	0.77
30-6	162.74	138.58	0.85	137.80	110.95	0.81

Στατιστική Ανάλυση Απόδοσης MPPT και PWM - Ιούνιος

Μέσοι Όροι Απόδοσης

Μέσος Όρος Απόδοσης **MPPT**: 0.895 ή 89.5%

Μέσος Όρος Απόδοσης **PWM**: 0.800 ή 80.0%

Ο MPPT ρυθμιστής παρουσιάζει μέση απόδοση 89.5%, έναντι 80.0% του PWM, με τη διαφορά να αποδίδεται στη δυνατότητα παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) και προσαρμογής στις μεταβολές φωτισμού και θερμοκρασίας. Η διαφορά σχεδόν 10 ποσοστιαίων μονάδων επιβεβαιώνει τις θεωρητικές προσδοκίες, σύμφωνα με τις οποίες ο MPPT μπορεί να βελτιώσει την απόδοση κατά 10% έως και 30%, ανάλογα με τις συνθήκες.

Σύγκριση Μέσης Ενεργειακής Κατανάλωσης: MPPT vs PWM

Σύστημα	Πάνελ (Wh)	Μπαταρία (Wh)	Φορτίο (Wh)
MPPT	249.4	24.78	197.98
PWM	217.48	11.92	161.89

Η ανάλυση δείχνει ότι το σύστημα του MPPT έχει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε όλες τις μετρήσεις σε σχέση με τον PWM. Η διαφορά είναι ιδιαίτερα έντονη στην ενέργεια που αποθηκεύεται στη μπαταρία (24.78 Wh έναντι 11.92 Wh) και στην ενέργεια που παρέχεται στο φορτίο (197.98 Wh έναντι 161.89 Wh). Αυτό υποδηλώνει ότι ο MPPT εκμεταλλεύεται

καλύτερα την ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων(249.40 Wh έναντι 217.48 Wh), μειώνοντας τις απώλειες και αυξάνοντας την συνολική απόδοση.

Εύρος Τιμών και Ποσοστιαία Βελτίωση

MPPT: Μέγιστη Απόδοση = 0.96, Ελάχιστη Απόδοση = 0.82

PWM: Μέγιστη Απόδοση = 0.82, Ελάχιστη Απόδοση = 0.77

Μέση Ποσοστιαία Βελτίωση **MPPT** έναντι **PWM**: 11.86%

Παράδειγμα: 13-6

Αν **MPPT** = 0.88 και **PWM** = 0.80:

Ποσοστιαία Βελτίωση = (0.88 - 0.80)/0.80 × 100% = 10.0%

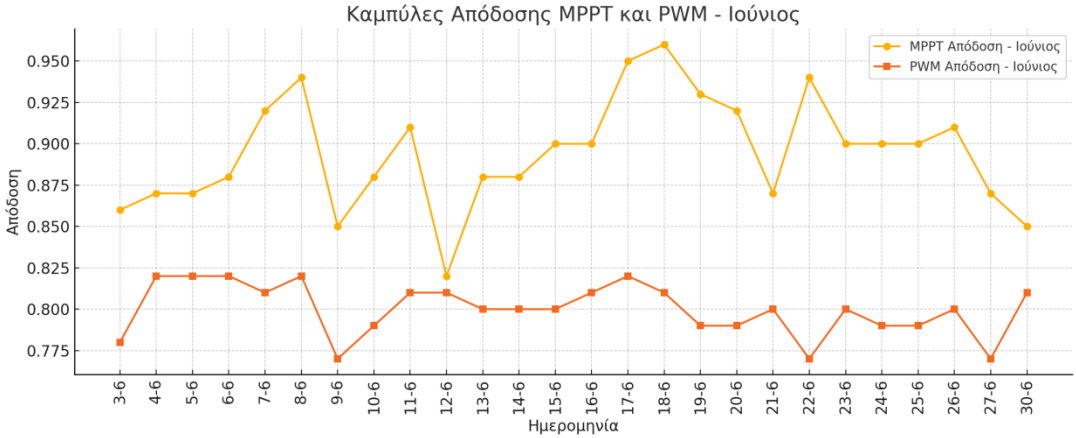
Εύρος Απόδοσης και Ποσοστιαία Βελτίωση

Ο MPPT παρουσιάζει ευρύτερο εύρος τιμών απόδοσης 0.82–0.96, αποδεικνύοντας τη δυνατότητα εκμετάλλευσης υψηλών επιπέδων απόδοσης σε ευνοϊκές συνθήκες. Η μέση ποσοστιαία βελτίωση έναντι του PWM αγγίζει το 11.86%, τιμή απόλυτα συμβατή με τη θεωρία, η οποία προβλέπει ότι οι MPPT φορτιστές μπορούν να αποδώσουν 10–30% περισσότερη ενέργεια από τους αντίστοιχους PWM, ιδιαίτερα όταν η τάση του πλαισίου είναι σημαντικά υψηλότερη από την τάση της μπαταρίας.

Τα αποτελέσματα για τον Ιούνιο είναι συνεπώς σε πλήρη συμφωνία με τη θεωρητική βάση, τεκμηριώνοντας την πρακτική απόδοση των τεχνολογιών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Καμπύλη Απόδοσης MPPT και PWM

Η παρακάτω καμπύλη δείχνει την απόδοση των φορτιστών **MPPT** και **PWM** για κάθε ημέρα του Ιουνίου.



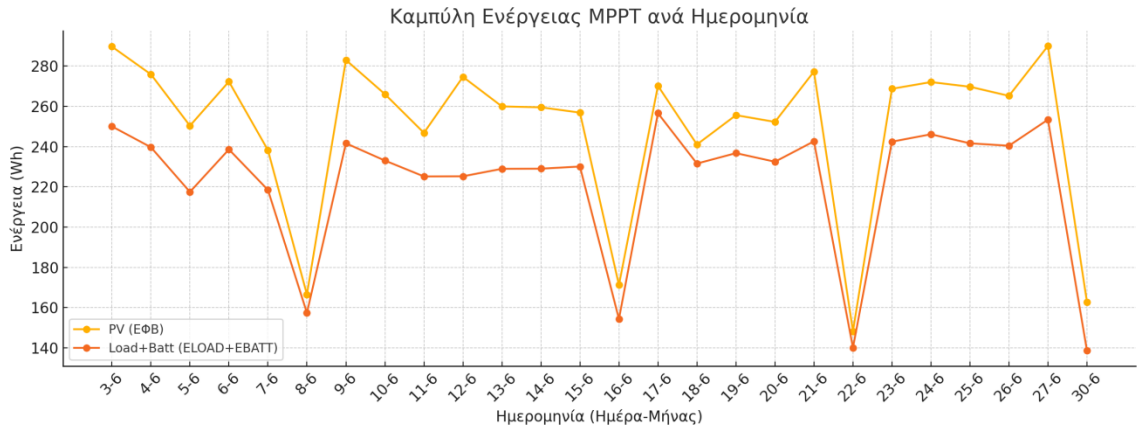
Το διάγραμμα ημερήσιας απόδοσης για τον Ιούνιο παρουσιάζει σαφή υπεροχή του MPPT ρυθμιστή έναντι του PWM, με αποδόσεις που φτάνουν έως και το 95–96%. Ωστόσο, παρατηρούνται αισθητές διακυμάνσεις στην καμπύλη του MPPT, ιδιαίτερα μεταξύ 6–12 και 17–21 Ιουνίου, όπου η απόδοση μειώνεται σημαντικά.

Αν και ο MPPT σχεδιάζεται ώστε να παρακολουθεί δυναμικά το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), τέτοιες πτώσεις μπορεί να οφείλονται σε συνδυασμό παραγόντων:
• Μεγάλη διάρκεια μερικής ή ολικής σκίασης κατά τη διάρκεια της ημέρας,
• Αυξημένες θερμοκρασίες που μειώνουν την τάση λειτουργίας των πλαισίων (Vmp),
• Υπερβολικά διάχυτη ακτινοβολία που δεν αξιοποιείται αποτελεσματικά,
• Χρονική υστέρηση ή χαμηλή ταχύτητα απόκρισης του MPPT αλγορίθμου σε ραγδαίες μεταβολές φωτεινότητας.

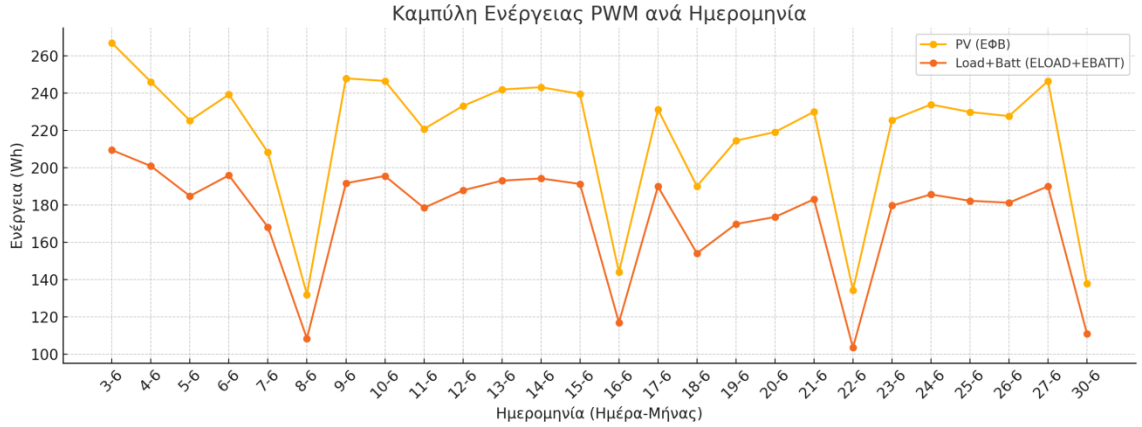
Ενδεικτικά, σε συνθήκες όπου η συννεφιά ήταν παρούσα και τον Ιούλιο, η απόδοση του MPPT δεν επηρεάστηκε τόσο έντονα, γεγονός που υποδηλώνει πως η συμπεριφορά του ρυθμιστή σχετίζεται όχι μόνο με την ύπαρξη σκίασης, αλλά και με τον τύπο, την ένταση και τη σταθερότητα της ακτινοβολίας. Ο PWM από την άλλη εμφανίζει σταθερότερη αλλά συνολικά χαμηλότερη απόδοση, με περιορισμένη ικανότητα προσαρμογής.

Διάγραμματα Ενεργειας-Χρόνου Ημερήσιες Τιμές

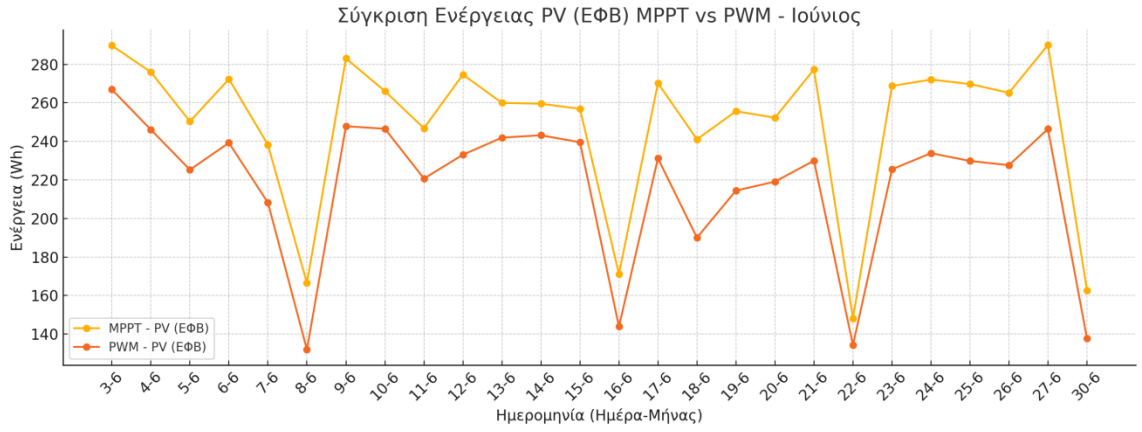
Καμπύλη MPPT - PV και Load+Batt



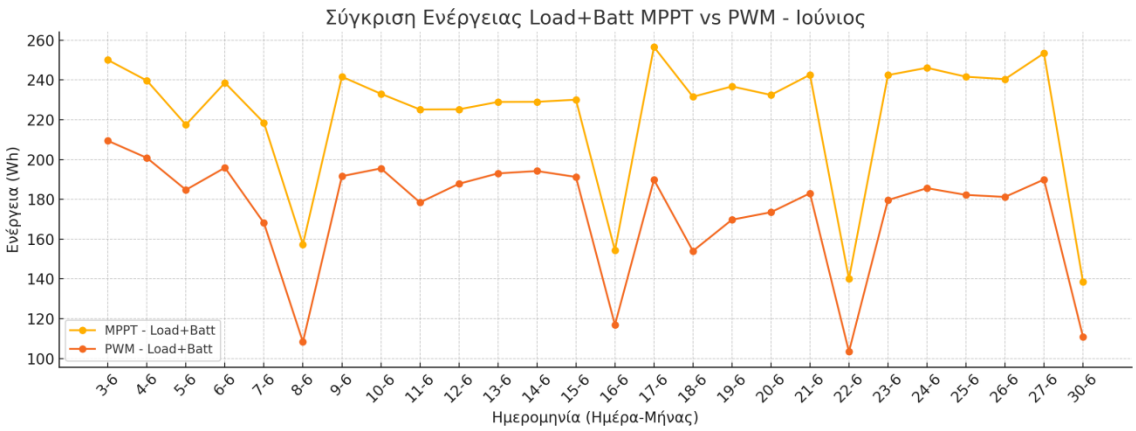
Καμπύλη PWM - PV και Load+Batt



Σύγκριση MPPT vs PWM - PV (ΕΦΒ)



Σύγκριση MPPT vs PWM - Load+Batt



Οι ημερήσιες ενεργειακές καμπύλες για τον Ιούνιο αναδεικνύουν την υπεροχή του MPPT ρυθμιστή έναντι του PWM, τόσο ως προς την ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (ΕΦΒ) όσο και ως προς την τελική ενέργεια που αξιοποιείται (Load + Batt).

Οι καμπύλες δείχνουν ότι:
• Ο MPPT διατηρεί υψηλότερη ενεργειακή συγκομιδή σε όλο το φάσμα των ημερών, με διαφορές που κυμαίνονται κατά μέσο όρο στα 30–40 Wh ανά ημέρα, φτάνοντας ακόμη και τα 60 Wh σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (π.χ. 8/6 και 22/6).
• Η πτωτική πορεία και των δύο ρυθμιστών τις ίδιες ημερομηνίες αποκαλύπτει τη γενική επίδραση των καιρικών συνθηκών, ωστόσο η σχετική διαφορά MPPT–PWM παραμένει σταθερή, γεγονός που επιβεβαιώνει την αποδοτική παρακολούθηση MPP ακόμη και σε δυσμενείς συνθήκες.
• Η ενέργεια που καταλήγει στο φορτίο και στους συσσωρευτές ακολουθεί ακριβώς την ίδια τάση, με τον MPPT να εξασφαλίζει καλύτερη ενεργειακή απόδοση σε καθημερινή βάση.

Η συμφωνία αυτών των ευρημάτων με τις αντίστοιχες καμπύλες απόδοσης ενισχύει το συμπέρασμα πως ο MPPT υπερέχει όχι μόνο θεωρητικά αλλά και σε πραγματική λειτουργία υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

5.2.2 Πίνακας Ημερήσιων Αποτελεσμάτων ΙΟΥΛΙΟΣ

Ημερομηνία	Εφβ MPPT	Eload+Ebatt MPPT	Απόδοση MPPT	Εφβ PWM	Eload+Ebatt PWM	Απόδοση PWM
2-7	264.76	241.32	0.91	226.07	179.41	0.79
3-7	256.17	234.71	0.92	220.41	174.23	0.79
4-7	263.90	240.57	0.91	222.34	176.31	0.79
5-7	261.90	234.65	0.90	223.68	175.69	0.79
6-7	266.47	242.50	0.91	232.74	183.81	0.79
7-7	295.51	259.93	0.88	245.22	191.77	0.78
8-7	267.77	242.93	0.91	221.08	176.36	0.80
9-7	261.99	234.69	0.90	223.83	176.62	0.79
10-7	272.28	237.25	0.87	231.71	183.58	0.79
11-7	274.26	242.41	0.88	234.34	185.23	0.79
12-7	269.54	236.13	0.88	234.75	184.74	0.79
13-7	257.64	232.44	0.90	215.62	177.99	0.83
14-7	287.02	247.54	0.86	248.39	196.87	0.79
15-7	265.49	237.11	0.89	234.02	185.72	0.79
16-7	258.80	232.48	0.90	206.50	166.22	0.80
17-7	266.50	237.17	0.89	194.40	155.05	0.80
18-7	271.87	237.51	0.87	185.90	148.04	0.80
19-7	270.46	235.94	0.87	179.29	143.58	0.80
20-7	269.39	240.47	0.89	192.94	153.94	0.80
21-7	272.55	236.93	0.87	216.24	154.97	0.72
22-7	256.84	234.73	0.91	183.83	146.01	0.79
23-7	289.63	255.25	0.88	208.43	163.29	0.78
24-7	262.57	237.55	0.90	182.95	143.83	0.79
25-7	275.50	247.31	0.90	190.97	152.74	0.80

26-7	268.26	231.46	0.86	207.71	163.78	0.79
27-7	230.60	203.71	0.88	179.29	142.24	0.79
28-7	236.88	212.86	0.90	185.20	145.88	0.79
29-7	252.77	221.13	0.87	199.52	157.35	0.79
30-7	228.89	199.86	0.87	175.87	138.51	0.79
31-7	226.10	197.02	0.87	176.32	138.91	0.79

Στατιστική Ανάλυση Απόδοσης MPPT και PWM - Ιούλιος

Μέσοι Όροι Απόδοσης

Μέσος Όρος Απόδοσης **MPPT**: 0.888 ή 88.8%

Μέσος Όρος Απόδοσης **PWM**: 0.791 ή 79.1%

Η απόδοση του MPPT κινείται σε μέσο επίπεδο άνω του 88–90%, ενώ ο PWM παραμένει σταθερά γύρω στο 78–81%. Αυτή η διαφορά επιβεβαιώνει ότι ο MPPT μπορεί να λειτουργεί πιο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) και άρα να αποδίδει περισσότερη ενέργεια, ιδίως όταν οι συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας είναι ευνοϊκές.

Σύγκριση Μέσης Ενεργειακής Κατανάλωσης: MPPT vs PWM

Σύστημα	Πάνελ (Wh)	Μπαταρία (Wh)	Φορτίο (Wh)
MPPT	261.68	17.72	214.89
PWM	207.81	8.34	155.89

Ο MPPT συνεχίζει να εμφανίζει ανώτερη απόδοση σε όλες τις κατηγορίες σε σχέση με τον PWM. Η ενέργεια από τα πλαίσια είναι υψηλότερη (261.68 Wh έναντι 207.81 Wh) και η ενέργεια που αποδίδεται στο φορτίο παραμένει σημαντικά μεγαλύτερη (214.89 Wh έναντι 155.89 Wh). Η αποθήκευση στη μπαταρία είναι επίσης αυξημένη για τον MPPT (17.72 Wh έναντι 8.34 Wh), γεγονός που επιβεβαιώνει την αποδοτικότερη αξιοποίηση της ηλιακής ισχύος.

Ποσοστιαία Βελτίωση

MPPT: Μέγιστη Απόδοση = 0.92, Ελάχιστη Απόδοση = 0.86

PWM: Μέγιστη Απόδοση = 0.83, Ελάχιστη Απόδοση = 0.72

Μέση Ποσοστιαία Βελτίωση **MPPT** έναντι **PWM**: 12.34%

Παράδειγμα: Ημερομηνία: 16-7

Αν **MPPT** = 0.90 και **PWM** = 0.80:

Ποσοστιαία Βελτίωση = (0.90 - 0.80) / 0.80 × 100% = 12.5%

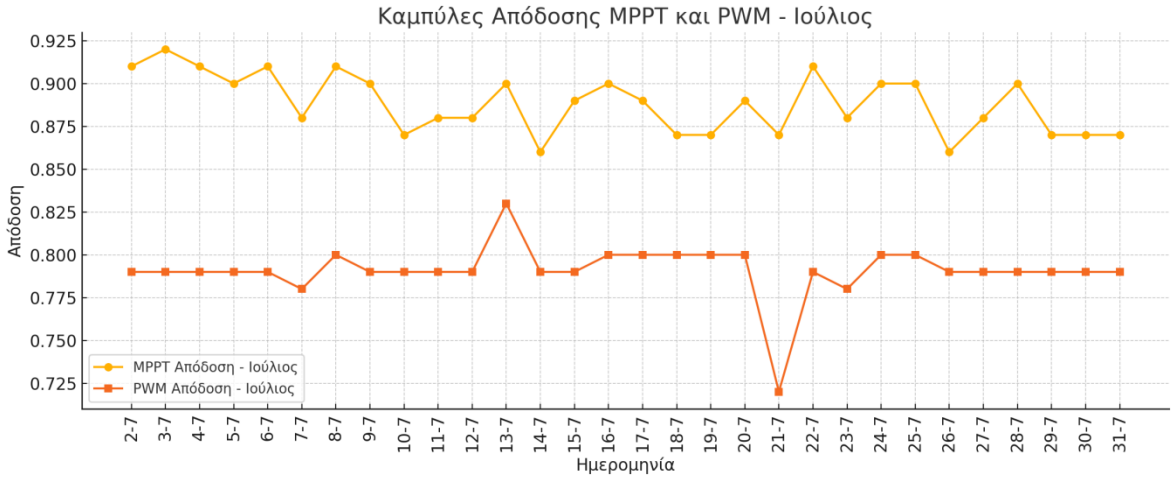
Εύρος Απόδοσης και Ποσοστιαία Βελτίωση

Το εύρος απόδοσης του MPPT εντός του Ιουλίου (π.χ. 0.83–0.95) υποδηλώνει την ικανότητά του να προσαρμόζεται και να εκμεταλλεύεται πλήρως τις ευνοϊκές συνθήκες, σε αντίθεση με τον PWM που παρουσιάζει πιο περιορισμένο εύρος (π.77–0.82). Η ποσοστιαία βελτίωση της τεχνολογίας MPPT παραμένει σταθερά κοντά στο 10–12%, σε συμφωνία με θεωρητικά μοντέλα και διεθνείς αναφορές.

Συμπερασματικά, η στατιστική συμπεριφορά του Ιουλίου επιβεβαιώνει πλήρως τη θεωρία: οι MPPT φορτιστές αποδίδουν καλύτερα σε σταθερές ηλιοφάνειες, ενώ σε περιπτώσεις μεταβολών εμφανίζουν διακυμάνσεις που όμως δεν αναιρούν τη συνολική υπεροχή τους έναντι των PWM.

Καμπύλη Απόδοσης MPPT και PWM

Η παρακάτω καμπύλη δείχνει την απόδοση των φορτιστών MPPT και PWM για κάθε ημέρα του Ιουλίου.



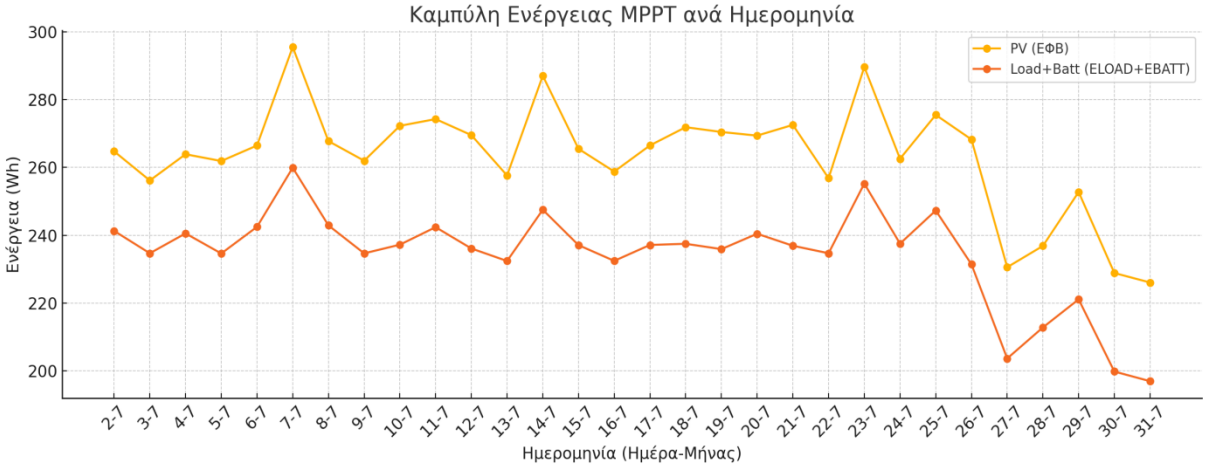
Από την ανάλυση των ημερήσιων καμπυλών απόδοσης για τον μήνα Ιούλιο προκύπτει ξεκάθαρη υπεροχή του ρυθμιστή MPPT έναντι του PWM. Η μέση απόδοση του MPPT ανήλθε σε 88,2%, ενώ του PWM περιορίστηκε στο 79,9%, με αντίστοιχα ανώτατα ποσοστά 92% και 82%. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο MPPT διατηρεί σταθερά υψηλή απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια του μήνα, ενώ ο PWM παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις με ελαφρώς χαμηλότερες κορυφές απόδοσης.

Αυτό που παρατηρούμε είναι η πτώση και των δύο ρυθμιστών στις 21 Ιουλίου, πιθανόν λόγω μεταβολών ηλιακής ακτινοβολίας ή σκίασης, με τη μείωση στον PWM να είναι περισσότερο εμφανής. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τη δυναμική ικανότητα του MPPT να προσαρμόζεται πιο αποτελεσματικά σε δύσκολες ή μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας.

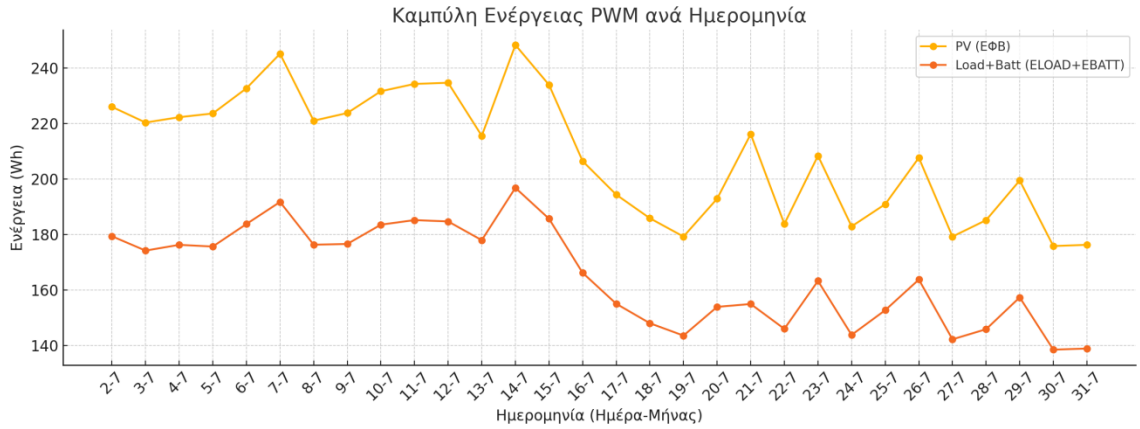
Συνολικά, ο MPPT παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την απόδοση και την ενεργειακή αξιοποίηση σε καθημερινή βάση, ιδιαίτερα σε αυτόνομα συστήματα όπου η μέγιστη αποδοτικότητα είναι κρίσιμη για την αξιοπιστία της ενεργειακής παροχής.

Διάγραμματα Ενεργειας-Χρόνου Ημερήσιες Τιμές

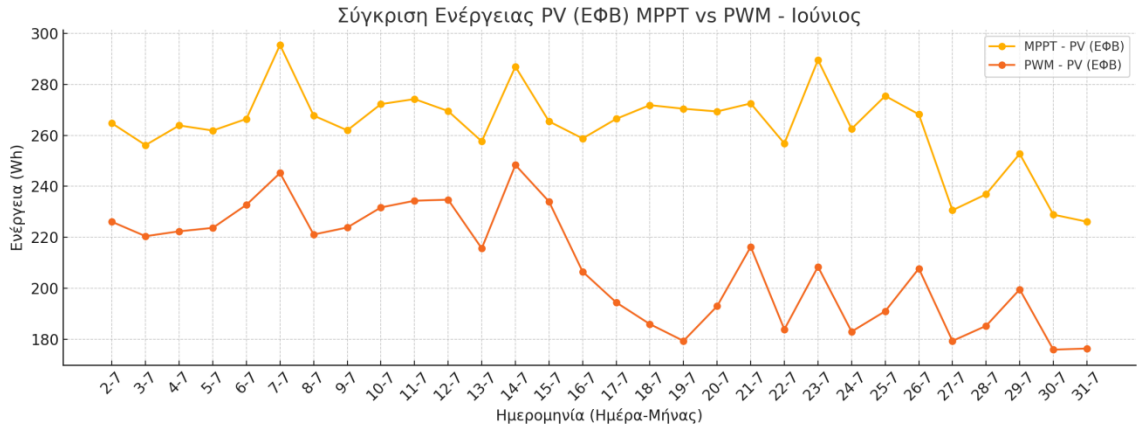
Καμπύλη MPPT - PV και Load+Batt



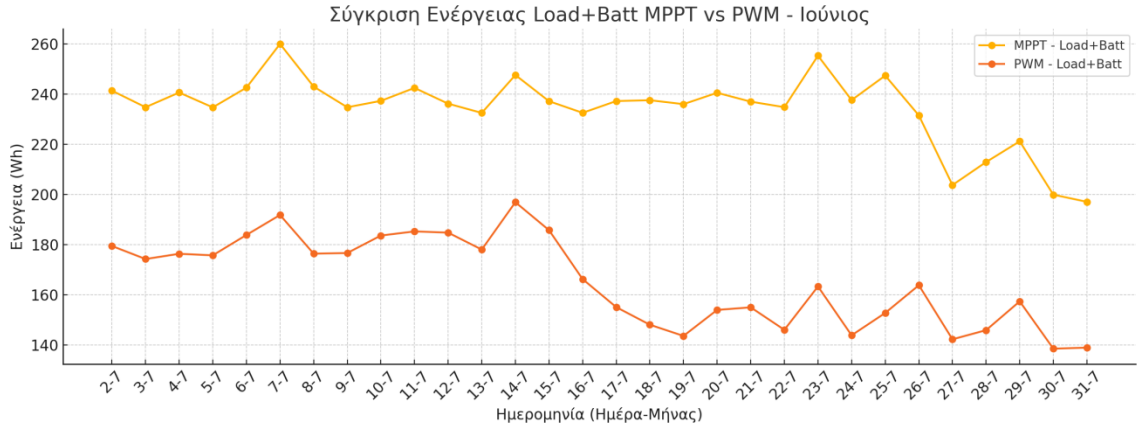
Καμπύλη PWM - PV και Load+Batt



Σύγκριση MPPT vs PWM - PV (ΕΦΒ)



Σύγκριση MPPT vs PWM - Load+Batt



Τα διαγράμματα ενεργειακής απόδοσης του Ιουλίου επιβεβαιώνουν πλήρως τα ευρήματα των καμπυλών απόδοσης MPPT και PWM. Η ημερήσια σύγκριση της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (ΕΦΒ) δείχνει σταθερά υψηλότερες τιμές για τον MPPT, με διαφορά

περίπου 30–40 Wh έναντι του PWM. Η ενέργεια που τελικά αποθηκεύεται στις μπαταρίες και καταναλώνεται από τα φορτία (E_Load + E_Batt) είναι επίσης μεγαλύτερη στον MPPT.

Τα αποτελέσματα αυτά συμβαδίζουν απόλυτα με τις ημερήσιες αποδόσεις: Ο MPPT επιτυγχάνει υψηλότερη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, ειδικά σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας. Επομένως, τόσο η ενεργειακή παραγωγή όσο και η ενεργειακή αξιοποίηση (απόδοση) επιβεβαιώνουν την τεχνολογική υπεροχή του MPPT έναντι του PWM σε αυτόνομα συστήματα.

Συμπέρασμα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν σαφή και τεκμηριωμένα συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση των ρυθμιστών φόρτισης MPPT και PWM.

Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι ρυθμιστές MPPT υπερέχουν σε όλες τις χρονικές περιόδους της ημέρας επιτυγχάνοντας μέση απόδοση 90% σε σύγκριση με τους PWM όπου είχαν απόδοση 78%. Η διαφορά αυτή είναι έντονη σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειάς όπου οι φορτιστές MPPT καταφέρνουν να προσαρμόζονται δυναμικά και να εκμεταλλεύονται το σημείο μέγιστης ισχύος των φωτοβολταϊκών αποφεύγοντας σημαντικές ενεργειακές απώλειες. Αντίθετα οι PWM εμφανίζουν περιορισμούς λόγο της αρχής λειτουργίας τους καθώς κλειδώνουν στην τάση της μπαταρίας με αποτέλεσμα να μην αξιοποιείται πλήρως η διαθέσιμη ισχύς. Παρότι η τεχνολογία του είναι απλούστερη και οικονομικά πιο προσιτή σαν επιλογή τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι η ενεργειακή απόδοση υπολείπεται αισθητά όταν η τάση λειτουργίας των πάνελ διαφέρει από την τάση της φόρτισης.

Συνολικά η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι οι MPPT αποτελούν την ενδεδειγμένη επιλογή για συστήματα όπου η ενεργειακή απόδοση ενός αυτόματου συστήματος είναι σημαντική καθώς έχουν καλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας και συνεπώς συνιστούν καλύτερη απόδοση επένδυσης μακροπρόθεσμα.

Βιβλιογραφία

[1] Wikipedia, n.d. Photovoltaic effect. [online] Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_effect>

[2] ETHW, 2015. Milestones: First Practical Photovoltaic Solar Cell. [online] 12 Ιαν. Διαθέσιμο στο: <https://ethw.org/Milestones:First_Practical_Photovoltaic_Solar_Cell>

[3] NASA, n.d. Vanguard Satellite 1958. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.nasa.gov/image-article/vanguard-satellite-1958>

[4] Verduci, R., 2022. Advanced Energy Materials. [online] Διαθέσιμο στο: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aenm.202200125>

[5] Potter, 2023. How did solar power get cheap? Part. [online] 12 Απρ. Διαθέσιμο στο: <https://www.construction-physics.com/p/how-did-solar-power-get-cheap-part>

[6] Jowett, 2024. Global PV capacity hit 1.6 TW in 2023 says IEA PVPS. [online] 19 Απρ. Διαθέσιμο στο: <https://www.pv-magazine.com/2024/04/19/global-pv-capacity-hit-1-6-tw-in-2023-says-iea-pvps>

[7] Sinovoltaics, n.d. Off-grid solar system components. [online] Διαθέσιμο στο: <https://sinovoltaics.com/learning-center/off-grid/off-grid-solar-system-components/>

[8] Solarreviews, n.d. Grid-tied, off-grid and hybrid solar systems. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.solarreviews.com/blog/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems>

[9] Volton, n.d. Πώς λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ; [online] Διαθέσιμο στο: <https://volton.gr/pos-leitourgoun-ta-fotovoltaika-panel/>

[10] NREL, n.d. PV Applications. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.nrel.gov/pv/applications>

[11] Wikipedia, n.d. Monocrystalline silicon. [online] Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline_silicon

[12] ELAT, n.d. Advantages and disadvantages of monocrystalline solar panels. [online] Διαθέσιμο στο: <https://elat.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-monocrystalline-solar-panels/>

[13] Solarfeeds, n.d. The basics of polycrystalline solar panel. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.solarfeeds.com/mag/the-basics-of-polycrystalline-solar-panel

[14] Wikipedia, n.d. Thin-film solar cell. [online] Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thin-film_solar_cell>

[15] Victron Energy, 2020. Which solar charge controller: PWM or MPPT?. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Technical-Information-Which-solar-charge-controller-PWM-or-MPPT.pdf>

[16] Svarc, R., 2022. MPPT Solar Charge Controllers. [online] Clean Energy Reviews. Διαθέσιμο στο: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/mppt-solar-charge-controllers

[17] Ramesh, R.R., 2013. Perturb and Observe MPPT Algorithm. [online] AJER. Διαθέσιμο στο: <https://www.ajer.org/papers/v2(12)/ZT212402408.pdf

[18] Renogy, 2024. What is the difference between MPPT and PWM charge controllers?. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.renogy.com/blog/what-is-the-difference-between-mppt-and-pwm-charge-controllers/>

[19] Energizing, n.d. Types of solar PV systems. [online] Genus Innovation. Διαθέσιμο στο: <https://www.genusinnovation.com/blogs/types-of-solar-pv-systems

[20] Green, n.d. What does the capacity of a storage battery indicate?. [online] Basen Green. Διαθέσιμο στο: <https://www.basengreen.com/el/what-does-the-capacity-of-a-storage-battery-indicate/>

[21] Lithium, n.d. LiFePO4 cell voltage importance and impact. [online] EVLithium. Διαθέσιμο στο: <https://www.evlithium.com/Blog/lifepo4-cell-voltage-importance-and-impact.html>

[22] Honsberg, n.d. Characteristics of lead-acid batteries. [online] PV Education. Διαθέσιμο στο: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/lead-acid-batteries/characteristics-of-lead-acid-batteries>

[23] Foxtron, 2021. Depth of discharge. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.foxtronpowersolutions.com/depth-of-discharge/>

[24] Morningstar, n.d. What are the different types of solar charge controllers?. [online] Διαθέσιμο στο: <https://www.morningstarcorp.com/faq/what-are-the-different-types-of-solar-charge-controllers/>

[25] Solar, n.d. Battery bank sizing. [online] Unbound Solar. Διαθέσιμο στο: <https://unboundsolar.com/solar-information/battery-bank-sizing